

Scientific Railway Signalling Symposium 2017

Die Steuerung des Eisenbahnbetriebs der Zukunft

19. April 2017



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT



Institut für
Bahnsysteme und
Bahntechnik



Veröffentlicht unter CC BY-SA 4.0 International

<https://creativecommons.org/licenses/>

Migrationsschritte für die Automatisierung des Bahnbetriebs	4
Formalisierung von betrieblichen und anderen Regelwerken – Das FormbaR Projekt	10
Localization Reference Train – Sichere Ortung für den Schienenverkehr	17
Neue Generation der Bahnsicherungstechnik. Anforderungen und Technologie	27
Entwurf einer neuen, regelbasierten Sicherungslogik unter Annahme der vollständigen Ortung aller Schienenfahrzeuge	36

1 Einleitung

Drei der großen Herausforderungen der Eisenbahn sind die Effizienzsteigerung, die Kostensenkung und die Verbesserung der Servicequalität. Eine Vollautomatisierung des Bahnbetriebs kann dazu beitragen, die Effizienz der Eisenbahn zu steigern und gleichzeitig Flexibilität und Leistungsfähigkeit zu steigern und/oder Kosten und Energieverbrauch zu senken. Erfahrungen mit der Automatisierung (Automatic Train Operation – ATO) von Eisenbahnsystemen liegen in verschiedenen Automatisierungsstufen (Grade of Automation – GoA) bereits vor. Die höchste Stufe GoA4, die auch „unbegleiteter Zugbetrieb“ (Unmanned Train Operation – UTO) genannt wird, sind seit den 80er Jahren in speziellen Umgebungen wie Metros, VAL (Vehicule automatique léger) oder U-Bahnen in Betrieb (Strobel 1982, Mücke 2008). Derzeit konzentriert sich die Diskussion auf den vollautomatischen Zugbetrieb auf regulären Bahnstrecken. Hier gibt es einige Fragestellungen, die komplexer sind als bei heute in Betrieb befindlichen Systemen: Leistungsfähigkeit, Länge und Gewicht der Züge unterscheiden sich stärker; es gibt andere und komplexere Betriebsabläufe; Anforderungen sind höher und die technologische Ausgangsposition ist heterogener.

Viele technische Komponenten wie Objekterkennung, Geschwindigkeitsregelung und Zugbeeinflussung sind heute bereits verfügbar. Ihre Einsatzfähigkeit ist durch den Einsatz in U-Bahnen und Metros nachgewiesen. Weitere Technologien sind in anderen Verkehrsbereichen wie Luft- und Raumfahrt oder Automotive bereits im Einsatz oder werden derzeit erprobt. Auf dieser Ausgangslage erscheint eine Vollautomatisierung des Bahnbetriebs auch auf Regelstrecken technisch möglich.

Normalerweise werden die Betriebsregeln heute nicht für den ausschließlich automatischen Betrieb geschrieben. Daher ist es heute eines der Hauptprobleme, die notwendigen Änderungen in den Betriebsregeln und Handbüchern zu identifizieren, um den fahrerlosen Zugbetrieb zu ermöglichen. Es muss nachgewiesen werden, dass das Sicherheitsniveau eines solchen Systems mindestens dem regulären "manuellen" Zugbetrieb entspricht. Neben den rein funktionalen Fragen, sind auch die rechtlichen Anforderungen auf die technische Lösung abzustimmen. In diesem Betrag soll die relevante Frage der Migration betrachtet werden. Mit dem European Rail Traffic Management System (ERTMS) und dem European Train Control System (ETCS) ist eine solide und europaweit standardisierte Basis vorhanden (ERA, Stanley 2011). Heute bereits sind Projekte in Bearbeitung, die sich mit dem automatischen Fahren (Automatic Train Operation – ATO) befassen (Shift2rail 2016). Darauf aufbauend muss in handhabbaren Schritten die Automatisierung vorangetrieben werden. Ein erster Schritt kann darin bestehen, Rangier- und Bereitstellungsfahrten zu automatisieren. Dies ist heute bei Metros und S-Bahnen bereits der Fall. Darauf aufbauend kann eine zeitweise automatisierte Fahrweise auf Strecken mit geringer Komplexität erfolgen, die dem Nachweis der Bahntauglichkeit von Systemen beispielsweise der Objekterkennung dient. Im Fahrgastbetrieb müssen neben dem reinen Fahren auch die Prozesse zur Abfertigung und zur Störungsbehandlung behandelt werden, wie dies in der IEC 62267 definiert ist (IEC 62267 2009). Ein Ansatz hierfür ist die Fernüberwachung und –Steuerung durch eine Betriebszentrale (Mücke 2008).

2 Grundsätzliche Sicherheitsprinzipien des Eisenbahnbetriebs

Zu Beginn der Historie der Eisenbahn wurde „auf Sicht“ gefahren. Bei den damals gefahrenen Geschwindigkeiten hielt man die Sicherung durch den Triebfahrzeugführer für ausreichend. Bei der Einführung mehrerer und schnellerer Züge auf einer Strecke wuchs der Bedarf an einer eindeutigen Zuordnung eines Streckenabschnitts zu einem Zug und zur eindeutigen Signalisierung der Erlaubnis zur Fahrt und der Sicherung ihrer gegenseitigen Abhängigkeiten. Um dieses Ziel zu erreichen, wurden Stellwerke entwickelt und eingeführt, die den Gegenfahr-, Folgefahr- und Flankenschutz durch die Sicherung von Fahrstraßen gewährleisteten. Um auch mehrere Züge zwischen zwei Bahnhöfen nacheinander fahren lassen zu können, wurden Blocksysteme installiert.

Die Beachtung der Signale obliegt dabei immer dem Triebfahrzeugführer. Die Einhaltung der Signalisierung und Sicherheitsvorschriften wurden mit Einführung der Zugbeeinflussung durch ein System unterstützt. Im Prinzip gilt dies heute für alle Triebfahrzeuge, die Streckenfahrten durchführen.

Die Eisenbahnbau- und -betriebsordnung (EBO) fordert heute, dass jeder Zug, der Streckenfahrten ausführt, mit einer Zugbeeinflussung ausgerüstet sein muss, die Gefahrenpunkt und Geschwindigkeit überwacht. Die Sicherungstechnik hat sich im Laufe der Zeit weiterentwickelt mit dem Ziel, den Menschen von solchen Handlungen zu entlasten, die sich häufig wiederholen und ein hohes Unfallrisiko beinhalten. So ist es beispielsweise wegen langer Bremswege und stark variierender Massen der Züge (86 t bis 3500 t) nicht möglich, eine Geschwindigkeits- und Bremsregelung nach „Gefühl“ auszuführen. Daher erfolgt die Überwachung der Geschwindigkeit mit einem Geschwindigkeitsprofil. Da die resultierenden Bremswege größer als die Sichtweite sein können, ist eine Reservierung und Sicherung der Fahrstraße notwendig, um einen Gegen-, Folgefahr- und Flankenschutz zu realisieren. Die Sicherung der Fahrstraße erfolgt nach dem jetzigen Stand der Vorschriften gegenüber anderen, externen Verkehrsteilnehmern, nur im Bereich der Bahnübergänge, obwohl der Gleiskörper i. A. nicht eingezäunt oder aufgeständert ist. Die relevanten Entwicklungsschritte der Eisenbahnsicherungstechnik zeigt *Bild 1* in Anlehnung an (Pottgießer 1972).

Systeme mit Sicherheitsverantwortung für die Eisenbahn müssen nach standardisierten Anforderungen z.B. nach EN 50126 (DIN EN 50126 2015) entwickelt werden, teilweise als mehrkanalige Systeme oder mit speziellen Komponenten und sicheren Kodierungsverfahren. Das wiederum führt zu einem entsprechend hohen Kostenniveau und hohen Investitionskosten bei Einführung neuer Systeme und Innovationen.

Auf dem Weg von einer automatischen Zugbeeinflussung ATP (Automatic Train Protection) bis hin zum vollautomatisierten und unbegleiteten Betrieb werden in der IEC 62267 GoA0 bis GoA4 unterschieden (IEC 62267 2009). *Bild 2* zeigt eine entsprechende Übersicht aus diesem Standard. Mit der Ausrüstung mit einer automatischen Zugbeeinflussung wird GoA1 erreicht. Eine automatische Fahr- und Bremsregelung entspricht einer GoA2. In der GoA3 fährt der Zug automatisch, wird aber in der Regel noch durch einen Zugbegleiter abgefertigt, der auch im Störfall eingreifen kann.

Im vollautomatischen Grad GoA4 fährt der Zug ohne Personal an Board und nur für eine Störungsbehandlung kann eine Betriebszentrale eingreifen. Eine beispielhafte Architektur nach (Mücke 2008) zeigt *Bild 3*.

Entwicklungsphasen	Disposition			Operation								Traktion			Fahrzeug			
	Information (Zugmeldungen)	zentrale Disposition national	vernetzte Disposition (international)	Fahrweg prüfen	Fahrweg einstellen	Fahrweg sichern	Signale geben	Führerstandssignalisierung	einheitliche Signalisierung	Zugfolge sichern	Räumung der Strecke prüfen	Hinderniserkennung/Kollisionsvermeidung	Halt-Signale beachten	ständige Überwachung der Geschwindigkeit	ständige Regelung der Zug- und Bremskräfte	Überwachung/ Sicherung Fahrgastwechsel	Störserkennung und -behandlung	
0																		mündliche Aufträge, Winkzeichen
1																		ortsfeste optische Signale
2																		Stellwerke, Signalabhängigkeit
3																		Streckenblock, Zugeinwirkung
4																		Gleisstromkreise in Bahnhöfen
5																		Induktive Zugbeeinflussung (INDUSI)
6																		Gleisstromkreise auf Strecken, Achszählkreise
7																		Zugnummernmelder, Zugzeitendrucker
8																		Selbststellbetrieb, Selbstblock
9																		Linienzugbeeinflussung (LZB)
10																		Automatische Fahr- und Bremssteuerung (AFB)
11																		Multifunktionsanzeigergerät (MFA)
12																		rechnergesteuerte Betriebszentrale (BZ)
13																		europäische Zugbeeinflussung (ERTMS-ETCS)
14																		europäisches Dispositionsnetzwerk (ERTMS-ETML)
15																		Automatische Hinderniserkennung
16																		Automatisierte Abfertigung
17																		automatische / zentralisierte Fahrzeugdiagnostik

Wirken des Menschen

(Automatisches) Wirken technischer Einrichtungen



 Wirken des Menschen
 (Automatisches) Wirken technischer Einrichtungen

Abb. 1 Signaltechnik und Stufen der Automatisierung des Bahnbetriebs nach (Strobel 1982) mit eigenen Ergänzungen

Basic function of train operation		Non-automated train operation	Semi-automated train operation	Driverless train operation	Unattended train operation
		NTO	STO	DTO	UTO
		GOA1	GOA2	GOA3	GOA5
Ensuring safe movement of trains	Ensure safe route	S	S	S	S
	Ensure safe separation of trains	S	S	S	S
	Ensure safe speed	X	S	S	S
Driving	Control acceleration and braking	X	S	S	S
Prevent collision with obstacles or persons		X	X	S	S
Supervising passenger transfer		X	X	X or S	S
Operation a train	Put in or take out of operation	X	X	X	S
	Supervise the status of the train	X	X	X	S
Ensuring detection and management of emergency situations		X	X	X	S and/or staff in OCC
Note X = responsibility of operations staff (may be realised by technical system) S = realised by technical system					

Abb. 2 Grade der Automatisierung (Grades of Automation) aus IEC 62267 (IEC 62267 2009)

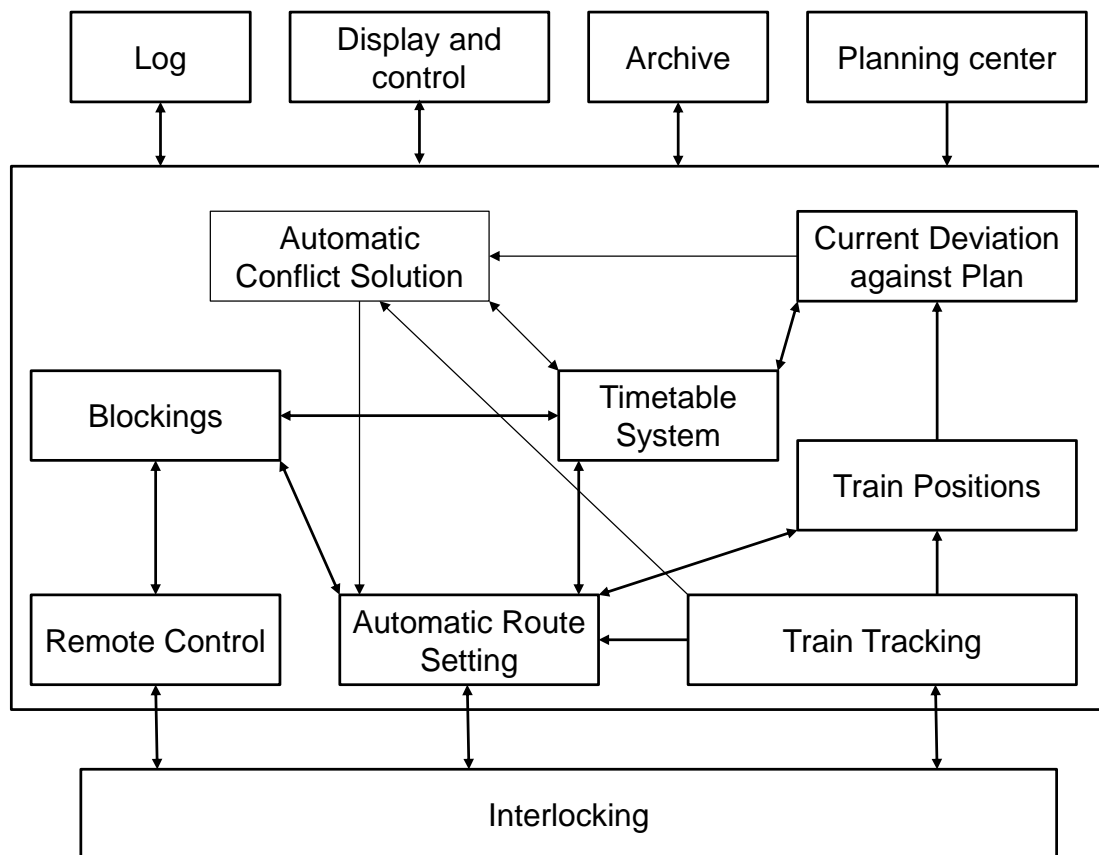


Abb. 3 Beispielhafte Architektur eines vollautomatisierten Bahnsystems aus (Mücke 2008)

3 Einführungsstrategien für das automatisierte Fahren

Die Einführung solcher Automatisierungssysteme kann nach verschiedenen Strategien erfolgen. In den folgenden Abschnitten sollen verschiedene dieser Strategien kurz vorgestellt werden.

3.1 Überlagernde Ansätze

In verschiedenen Bereichen des deutschen Bahnbetriebs wird heute bereits mit der sogenannten automatischen Fahr- und Bremssteuerung (AFB) gefahren. Dieses System erlaubt da, wo über die Linienzugbeeinflussung (LZB) hinreichend detaillierte Daten vorliegen, eine automatische Steuerung nach einem vorgegebenen Geschwindigkeitsprofil. Es handelt sich also um eine Art Assistenzsystem, dass dem Lokführer die Aufgabe der Einhaltung der richtigen Geschwindigkeit in Abhängigkeit von der Position entlang der Strecke abnimmt. Grundsätzlich liegen auch bei der Nutzung von ETCS entsprechende Daten zu großen Teilen vor. Daher finden sich in (Shift2Rail 2016) auch verschiedene Projekte, die entsprechende Ansätze für eine ATO auf der Basis von ETCS verfolgen.

Hierauf aufbauend kann nun die Assistenz zu einem vollständigen Automatisierungssystem ausgebaut werden. Auf diesem Wege werden immer mehr Aufgaben des Triebfahrzeugführers von automatischen Funktionen übernommen. Die Aufgabe des Fahrzeugführers verschiebt sich immer mehr hin zu einer Überwachung der Automatisierung, die schlussendlich in eine Zentrale verlagert werden kann.

3.2 Intermittierende Ansätze

Die Komplexität des realen Bahnbetriebs ist oft höher als die von Metros oder VAL Systemen. Allerdings ist diese Komplexität räumlich – oder bezogen auf eine Zugfahrt zeitlich - nicht gleichmäßig verteilt.

Gerade auf regionalen Strecken ist die Betriebsführung zwischen zwei Bahnhöfen oft geradezu langweilig und nur in Bahnhöfen kommt sind die Bedingungen anspruchsvoller bis zu großen Bahnhöfen, die sehr komplex und unübersichtlich sein können. Daraus resultiert der Ansatz, die Automatisierung bis hin zu GoA4 dort zuerst zu erproben und einzuführen, wo die Bedingungen einfach sind und dem Fahrzeugführer die Abschnitte zu überlassen, die schwerer automatisierbar sind. Dieser Ansatz weist Ähnlichkeiten mit der Automatisierung von Stellwerken auf, wo auch immer mehr Routineaufgaben automatisch ausgeführt werden und die schwierigeren Fälle dem Fahrdienstleiter vorbehalten sind.

3.3 Reduzierende Ansätze

Ein grundlegend anderer Ansatz beruht darin, die Betriebsführung soweit irgend möglich zu reduzieren und nur noch diesen Teil zu automatisieren. Der Grundgedanke hierbei ist, dass auf vielen Strecken der volle Umfang des Bahnbetriebs nicht zum Einsatz kommt, sondern nur eine bestimmte, notwendige Untermenge. Vor allem das Fahren und Bremsen entsprechend einem Geschwindigkeitsprofil und das Anhalten an den definierten Stellen bildet den Kern dieser Untermenge. Dieser Ansatz wird derzeit vor allem für Nebenstrecken und Stichstrecken diskutiert (Siemens).

4 Funktionale und technische Aspekte

Neben diesen Ansätzen zur Einführung sind auch verschiedene technologische und funktionale Aspekte zu behandeln. So sind die folgenden Funktionalitäten noch im Detail zu lösen:

1. Hochgenaue und zuverlässige Ortung: Für die Überwachung des Geschwindigkeitsprofils und die Bremsung auf einen exakten Zielpunkt hin ist es zwingend notwendig den Zug mit einer definierten Genauigkeit und gleichzeitig zuverlässig zu orten. Projekte mit diesem Fokus sind derzeit in der Planung (Shift2Rail 2016).
2. Zuverlässige Kommunikation: Für die beidseitige Übertragung der für die Steuerung und Überwachung notwendigen Daten ist eine zuverlässige Kommunikationstechnologie notwendig. Hierzu gibt es bereits umfängliche Untersuchungen und Erprobungen. Der relevante Aspekt hier ist die Verfügbarkeit der Technologie in den kommenden Jahren und deren Kostenentwicklung.
3. Hinderniserkennung: Automatisch fahrende Systeme benötigen Technologien, die Hindernisse vor dem Zug erkennen und ggf. Bremsungen auslösen. Aus dem Bereich des automatisierten Straßenverkehrs sind Systeme bekannt, die Hindernisse auf die dort notwendigen Entfernungen erkennen können. Für einen Einsatz bei der Eisenbahn muss noch geklärt werden, ob diese Systeme die Anforderungen an die Zuverlässigkeit der Erkennung und die notwendige Entfernung erfüllen können. Allerdings spielen hier auch neben technischen Anforderungen in erheblichem Maße rechtliche Anforderungen eine Rolle.
4. Cyber Security: Vollautomatische Systeme müssen gegen Angriffe von außen gut geschützt sein. Unter Federführung der deutschen Bahn und der Universität Darmstadt finden gerade umfängliche Arbeiten zu diesem Themenkomplex statt (DB AG).

5 Zusammenfassung und Ausblick

Die Vollautomatisierung des Bahnbetriebs ist einer der möglichen Ansätze, mit denen die Eisenbahn auf die aktuellen Herausforderungen reagieren kann. Technologien für das vollautomatische Fahren sind bereits in speziellen Anwendungsumgebungen wie beispielsweise Metros erprobt. Andere Technologien

werden gerade für den Einsatz in Straßenverkehr ertüchtigt. Um die Vollautomatisierung im Bahnbetrieb einzuführen, können verschiedene Ansätze verfolgt werden. Es gibt den Weg der erweiterten Assistenz, bei der technische Systeme immer Aufgaben vom Triebfahrzeugführer übernehmen. Ein anderer Ansatz steigert die Automatisierung vor allen in den Abschnitten der Zugfahrt, die einfach zu automatisieren sind. Hier beginnt die Einführung auf den Strecken zwischen den Bahnhöfen und entwickelt sich in die Bahnhöfe hinein, bis schlussendlich auch hier eine Vollautomatisierung erreicht ist. Ein dritter Ansatz – insbesondere für Nebenstrecken mit einfachen Betriebsbedingungen – beginnt mit der Reduzierung der Betriebsverfahren und automatisiert nur den minimal notwendigen Teil des Betriebs.

Die Automatisierung des Bahnbetriebs wird in den kommenden Jahren deutlich zunehmen und der Bahn helfen die Herausforderungen zu bestehen. Welcher der diskutierten Ansätze dabei zum Einsatz kommt, wird weniger von technischen als von betrieblichen und rechtlichen Randbedingungen abhängen. Viele Projekte in Deutschland und Europa befassen sich derzeit mit dem Thema Automatisierung des Bahnbetriebs, so dass in naher Zukunft mit ersten Pilotprojekten gerechnet werden kann.

6 Literaturverzeichnis

DB AG. http://www1.deutschebahn.com/innovationsallianz/start/forschung/AG_CYSIS.html

DIN EN 50126 (2015). Bahnanwendungen - Spezifikation und Nachweis von Zuverlässigkeit, Verfügbarkeit, Instandhaltbarkeit und Sicherheit (RAMS) - Teil 1: Generischer RAMS Prozess; Deutsche Fassung prEN 50126-1:2015

ERA ETCS Spezifikation. <http://www.era.europa.eu/Core-Activities/ERTMS/Pages/Set-of-specifications-2.aspx>.

IEC 62267 (2009). Railway applications - Automated urban guided transport (AUGT) - Safety requirements. Beuth, Berlin.

Mücke, W. (2008). Betriebsleittechnik im öffentlichen Verkehr. Tetzlaff GmbH Co. KG, Hamburg 2008.

Pottgießer, H. (1972). Betriebssicherheit und Signaltechnik bei der Deutschen Bundesbahn. Eisenbahntechnische Rundschau (ETR), 21, Heft 11, Seiten 408 – 417.

Shift2Rail (2016). Multi-Annual Action Plan (MAAP), Brüssel.

Siemens: Projekt Zu(g)kunft.
<https://www.siemens.com/customer magazine/de/home/mobilitaet/innotrans/projekt-zugkunft.html>

Stanley, P. (2011). ETCS for Engineers. Eurailpress, DVV Media Group, Hamburg.

Strobel, H. (1982). Computer Controlled Urban Transportation. John Wiley & Sons Ltd.

Eduard Kamburjan¹

Prof. Dr. rer. nat. Reiner Hähnle¹

¹Fachgebiet Software Engineering, TU Darmstadt

Abstract

Das FormbaR Projekt entwickelt ein formales Modell für Betriebsverfahren mit Schwerpunkt auf Kommunikation zwischen Betriebsstellen, LST-Elemente und Zügen. Mit Methoden des Software Engineering wird eine einheitliche Behandlung verschiedener Kommunikationsarten ermöglicht. Diese Vereinheitlichung ermöglicht es, sowohl statische als auch dynamische Analysen auf demselben Modell durchzuführen. Dadurch lassen sich die Konsequenzen aus neuen Betriebsverfahren und lokalen Ausfällen für das globale Verhalten analysieren. Außerdem lässt sich ein neuer Safety-Begriff formalisieren, der Störfälle und Betriebsverfahren wie ETCS Level 2 und 3 abdeckt.

1 Einführung

Formale Methoden sind ein etabliertes Werkzeug im Eisenbahnwesen. Sie wurden mehrfach in industriellen Projekten angewandt und sind für die Entwicklung von Softwaresystemen im Eisenbahnwesen empfohlen. Bisherige Ansätze konzentrieren sich auf die Spezifikation und Verifikation von Software für Stellwerke, sowie auf die Modellierung von kritischen „low-level“ Elementen wie Verschlussplanlogik und ETCS Controller. Im Gegensatz dazu entwickelt das FormbaR Projekt¹ eine Modellierung von Betriebsverfahren im Eisenbahnbetrieb und legt den Schwerpunkt auf die *Kommunikation* zwischen Betriebsstellen, LST-Elementen (z.B. Signalen) und Zügen. Das Ziel ist ein Modell, welches es ermöglicht

- die Auswirkungen von neuen Betriebsverfahren und mikroskopischen (lokalen) Ausfällen auf makroskopische Eigenschaften (d.h. das globale Verhalten) zu analysieren,
- unterschiedliche statische und dynamische Analysen auf ein und demselben Modell durchzuführen und zu kombinieren,
- einen formalen Safety-Begriff zu entwickeln, der Störfälle und Betriebsverfahren wie ETCS Level 2 und 3 abdeckt.

Insbesondere sollen sowohl Simulationen von konkreten Betriebsszenarien, als auch allgemeine Analysen von Betriebsabläufen möglich sein. Das Modell legt den Fokus nicht auf die physikalischen Vorgänge, sondern spiegelt die Kommunikation gemäß Ril. 408 und anderen Regelwerken wieder.

Als Modellierungssprache wird ABS (Johnsen et al. 2010) genutzt. ABS ist eine Aktor-basierte Sprache (Hewitt et al. 1973) für die Modellierung und Analyse von verteilten und nebenläufigen Softwaresystemen. Das Nebenläufigkeitsmodell von ABS basiert auf asynchroner Kommunikation zwischen streng abgekapselten Objekten und passt deshalb besonders gut auf die Kommunikationsverfahren im Eisenbahnbetrieb. Bei der Entwicklung von ABS wurde spezieller Wert

¹ Das FormbaR Projekt ist Teil der AG Signalling in der Innovationsallianz zwischen TU Darmstadt und Deutsche Bahn Netz AG.

auf eine formale Semantik gelegt, die verschiedene skalierbare Analysen (Albert et al. 2014) bis hin zur formalen Verifikation (Din et al. 2015) ermöglicht. Des Weiteren sind Modelle in ABS ausführbar und kalibrierbar, eignen sich mithin also zur präzisen Simulation von Betriebsabläufen.

Dieser Artikel basiert auf Material aus veröffentlichten Arbeiten (Kamburjan und Hähnle 2017). Details der Modellierung, eine Einführung in ABS und eine Zusammenfassung des Standes der Forschung sind dort zu finden.

2 Modellierung – Bahnbetrieb als Informationsfluss

Im FormbaR Projekt wird Bahnbetrieb als Informationsfluss modelliert, d.h. als ein System von kommunizierenden Informationsträgern. Jede Art von Kommunikation wird gleich behandelt: Befehle, Signale und Elemente des Meldeprotokolls können so einheitlich analysiert werden. Es wird lediglich unterschieden welcher Informationsinhalt übermittelt wird, nicht in welcher Form. Dadurch kann zum Beispiel von Form- und Lichtsignalen abstrahiert werden, da beide denselben Signalbegriff kommunizieren.

Diese Art der Modellierung kombiniert mikro- und makroskopische Aspekte. Es werden alle Punkte einer Strecke explizit modelliert, bei denen Information übermittelt werden kann (Punkte für Informationsfluss genannt, s.u.). Zwischen solchen Punkten findet im Normalbetrieb keine Kommunikation statt und die Simulation kann entsprechend vereinfacht werden, solange keine Störung vorliegt. Um größere Streckennetze zu ermöglichen, werden Infrastrukturelemente nicht zusammengefasst, sondern auf ihre Eigenschaft als punktförmige Informationsträger und -übermittler reduziert.

2.1 Punkte für Informationsfluss

Die Infrastruktur für den Bahnbetrieb wird als Graph modelliert, dessen Knoten Punkte für Informationsfluss darstellen. Ein solcher Punkt ist eine Stelle auf dem Gleis, an dem Information von oder zum Zug übermittelt werden kann. Mögliche Punkte für Informationsfluss sind:

- LST-Elemente wie Vorsignale, Achszähler an Gleisfreimeldeabschnittsgrenzen an Gefahrenpunkten, Weichenanfänge und -enden;
- Regelwerksrelevante Elemente wie die Stelle an der ein Signal spätestens sichtbar ist;
- Änderungen der Gleisgeometrie wie Steigungen oder Tunneleinfahrten und -ausfahrten. Diese Art von Information wird nicht als Eigenschaft der Kanten des Graphen, d.h. des Gleises, modelliert, sondern als Information, die übermittelt wird, sobald sich ein Parameter ändert. Physikalische Eigenschaften werden lediglich für die Berechnung von Fahrzeiten zwischen solchen Punkten betrachtet, rein bauliche Eigenschaften werden nicht modelliert.

2.2 Schichtenmodell für Bauelemente

Ein Punkt für Informationsfluss vereinigt mehrere Sichten auf ein Bauelement: seine Position, die zu übermittelnde Information als Zustand, sowie seine Schnittstelle zum Stellwerk. Daher wird Infrastruktur in drei Schichten modelliert, wobei ein Punkt für Informationsfluss auf mehrere Objekte in mehreren Schichten aufgeteilt wird. Folgende Schichten werden modelliert:

1. **Graphen Schicht:** Die erste Schicht ist der oben beschriebene (ungerichtete) Graph, wobei Kanten nur die Gleislänge als Attribut haben. Jeder Knoten entspricht der Position eines Punktes für Informationsfluss.
2. **Physikalische Schicht:** Die zweite Schicht modelliert den Zustand eines Punktes für Informationsfluss, ihre Elemente repräsentieren *physikalische Elemente* und entsprechen den in Abschnitt 2.1 beschriebenen Bauelementen bzw. davon abgeleiteten Standorten. Jedes Element auf dieser Schicht ist einem Knoten des Graphen zugeordnet. Einem Knoten kann mehr als ein physikalisches Element zugeordnet haben, z.B. bei PZB-Magneten und Hauptsignalen am selben Standort.
3. **Logische Schicht:** Die dritte Schicht modelliert die im Regelwerk beschriebene Schnittstelle zwischen Bauelementen und Stellwerk, ihre Elemente sind *logische Elemente*. Ein logisches Element gruppiert physikalische Elemente, z.B. besteht ein logisches Signal aus (mindestens) einem Vorsignal, einem Hauptsignal, (mindestens) einem Gefahrenpunkt und (mindestens) zwei PZB Magneten. Nicht jedes physikalische Element ist einem logischen Element zugeordnet, z.B. Tunneleinfahrten und andere Punkte für Informationsfluss, die ausschließlich Änderungen der Gleisgeometrie übertragen. Diese sind vom Stellwerk nicht ansteuerbar und haben entsprechend auch kein logisches Element. Ein physikalisches Element kann mehreren logischen Elementen zugeordnet sein, z.B. ein kann ein Vorsignal mehreren logischen Signalen zugehören. Jedes logische Element ist genau einem Stellwerk zugeordnet.

Das Stellwerk besitzt die Sicht auf logische Signale. Wenn eine Bedienhandlung ein Signal umstellt, werden alle physikalischen Element umgestellt und das Regelwerk benutzt „Signal“ als Begriff für alle diese Bauteile. Hingegen hat der Triebfahrzeugführer die Sicht auf physikalische Elemente. Das Regelwerk benutzt „Hauptsignal“ und „Vorsignal“ um sein Verhalten zu beschreiben.

Kommunikation findet ausschließlich zwischen den Schichten statt: sobald ein Zug einen Knoten erreicht, liest er den Zustand aller physikalischen Elemente an diesem Knoten und das zugehörige logische Element (falls vorhanden) sendet eventuell ein Signal an das Stellwerk. Das Stellwerk kommuniziert mit dem logischen Element, welches den Befehl an die physikalischen Elemente verteilt. Diese leiten den Befehl an die einzelnen Knoten weiter. Falls ein Zug den Zustandswechsel beobachten kann, wird auch dieser benachrichtigt. Abbildung 1 zeigt ein Einfahrtssignal und eine Weiche in der Einfahrt eines Bahnhofs und die Aufteilung in Schichten.

2.3 Modellierung der Züge

Die Modellierung der Züge basiert auf Ideen aus der *discrete event simulation* (Misra 1986): Jeder Zug generiert eine Sequenz von Ereignissen, wobei jedes Ereignis ein Tripel aus Ort, Zeit und Zustandswechsel des Zuges ist. Zustandswechsel eines Zuges haben drei mögliche Ursachen: (1) Kommunikation mit der Infrastruktur, d.h. Zugspitze oder Zugende passieren einen Knoten der Graphen Schicht, (2) Kommunikation mit dem Fahrdienstleiter, d.h. Befehle und (3) Anfang und Ende von Beschleunigungsvorgängen.

Kommunikation mit der Infrastruktur ist ausschließlich an Knoten, also an Punkten für Informationsfluss, möglich. Befehle werden von außen ausgelöst, und Ort und Zeitpunkt können aus dem Zustand vorausberechnet werden. In einem Modell des Informationsflusses sind nur zwei Punkte eines Zugs relevant: Zugspitze und Zugende. Die Zeit zwischen den oben erwähnten Ereignissen (1)-(3) muss nicht explizit simuliert werden: An jedem Punkt für Informationsfluss berechnet der Zug sein nächstes Ereignis von Typ (1) oder Typ (3) und wartet bis der berechnete Zeitpunkt eintrifft. Falls ein Befehl ausgeführt wird, wird der Zustand aktualisiert und das nächste Ereignis neu berechnet. Die

Simulation besteht aus den Ereignissen, die durch Züge und Stellwerke hervorgerufen werden. Da jedes nächste Ereignis vorausberechnet wird, braucht die zwischen zwei Ereignissen vergangene Zeit nicht explizit modelliert werden.

2.4 Modellierung von Betriebsstellen

Betriebsstellen steuern logische Elemente, um durch Kommunikation Safety-Invarianten für den Zugbetrieb sicherzustellen. Ril 408 befasst sich ausschließlich mit dem Fahren im Streckenblock mit folgender Invariante als Safety-Begriff (für den Regelbetrieb):

(S1) Es ist immer ein Halt anzeigendes Signal zwischen zwei fahrenden Zügen

Dies ist nicht der Fall, wenn Fehlerfälle betrachtet werden; wird ein Zug vom PZB System beim Überfahren eines haltanzeigenden Signals notgebremst, dann ist kein Signal zwischen diesem Zug und einem eventuell bereits in dem Streckenblock befindlichen zweiten Zug. Das Verfahren stellt den Safety-Begriff des Fahrens mit absolutem Bremswegabstand sicher:

(S2) Der Abstand zwischen zwei Zügen ist größer als die Summe ihrer Bremswege

Safety außerhalb von Zugmeldestellen (Zmst) wird durch drei Verfahren garantiert

1. Erlaubniswechsel stellt sicher, dass auf einer Strecke zwischen zwei Zmst nie zwei Züge aufeinander zufahren. Diese Kommunikation findet zwischen zwei Zmst statt.
2. Der Streckenblock stellt sicher, dass der Safety-Begriff (S1) im Regelbetrieb garantiert wird. Diese Kommunikation findet zwischen Zugfolgestelle statt.
3. Das Zugmeldeverfahren stellt sicher, dass Züge zurückgemeldet werden und nur ausfahren dürfen, wenn in der Zielzugmeldestelle kein Deadlock ausgelöst wird.

Jedes einzelne dieser Verfahren wird als Netzwerkprotokoll betrachtet und kann also solches analysiert werden. Dies ist möglich, weil wir verschiedene Kommunikationsarten uniform modellieren.

3 Fallstudien

3.1 Safety Analyse

Wir zeigen, wie Safety-Begriffe als Aussagen über Kommunikationsprotokolle formuliert und nachgewiesen werden können. Solche Aussagen sind dann für jedes Streckennetz gültig, sofern es wohlgeformt ist, also den Richtlinien entspricht. Zum Nachweis setzen wir ein Werkzeug für deduktive Verifikation ein. Dies ist dazu geeignet, Safety-Eigenschaften für beliebige Betriebsszenarien zu modellieren und formal nachzuweisen. Typische Safety-Begriffe sind Invarianten wie (S1), d.h. Beschreibungen von Zuständen die zu jedem Zeitpunkt gelten müssen.

Als Beispiel betrachten wir ein Verfahren zum Erlaubniswechsel, welches im deutschen Netz nur im Fall der Störung eines selbstständigen Streckenblocks benutzt wird:

Für eine Strecke zwischen zwei Zmst hat genau eine Zmst die Erlaubnis. Ein Ausfahrtsignal für diese Strecke kann nur gestellt werden, wenn die entsprechende Zmst die Erlaubnis hat. Jeder Zug wird zurückgemeldet und die Erlaubnis kann nur gewechselt werden, wenn alle Züge, die die Zmst auf dieser Strecke verlassen zurückgemeldet wurden.

Dieses Verfahren erfüllt folgende Safety-Invariante (Pachl 2013):

(S3) Die Erlaubnis für eine Strecke S zwischen A und B kann nur von A zu B wechseln, wenn sich keine Züge auf S befinden.

Unter der Annahme, dass ein Zug die Strecke genau dann verlässt, wenn er zurückgemeldet wird, können wir die Invariante umformulieren:

(S4) Die Erlaubnis für eine Strecke S zwischen A und B kann nur von A zu B wechseln, wenn alle Züge, die A auf S verließen, zurückgemeldet wurden.

Der Unterschied ist, dass die Formulierung (S3) einen *Zustand* beschreibt, (S4) aber *vergangene Kommunikation*. D.h. die zweite Invariante kann wieder umformuliert werden, wobei sie ausschließlich durch das *Verhältnis* zwischen Nachrichten ausgedrückt wird:

(S5) Wenn zum Zeitpunkt t $Z_{\text{mst } A}$ zu $Z_{\text{mst } B}$ die Nachricht *Erlaubnis(S)* schickt, dann gibt es für jede Nachricht *Angenommen (A, S, Z)* zum Zeitpunkt t' vor t eine Nachricht *Rückmeldung (A, S, Z)* zu einem Zeitpunkt t'' , der zwischen t' und t liegt, also $t' < t'' < t$.

Dies kann mit formalen Methoden des Software Engineerings durch automatisierte Werkzeuge analysiert werden: es kann geprüft werden, ob ein Modell des Bahnbetriebs das Kommunikationsprotokoll (S5) stets einhält. Wichtig ist die Annahme, unter der die Umformulierung von (S3) nach (S4) ausgeführt wurde. Es sind also zwei Eigenschaften zu zeigen: (1) das Modell hält das Kommunikationsprotokoll (S5) ein und (2) jedes modellierte Streckennetz erfüllt die Annahme.

Der erste Teil betrifft das Betriebsverfahren und ist unabhängig vom Streckennetz, der zweite Teil betrifft die Infrastruktur. In Deutschland wird dies von Ril 819 garantiert und ist unabhängig vom Betriebsverfahren. Allgemein nimmt unsere Modellierung an, dass die Infrastruktur Ril 819 einhält. Wenn lokale Umstände Ausnahmen erzwingen, kann der Nachweis der Eigenschaften auch auf ein konkretes Infrastrukturbeispiel eingeschränkt werden.

3.2 Simulation

Auch lokale Änderungen an den in den Richtlinien festgelegten Regeln haben im allgemeinen globale Auswirkungen auf Kapazität und Planmäßigkeit. Das Ausmaß solcher Auswirkungen ist zudem von der konkreten Infrastruktur abhängig. Folgende Fallstudie demonstriert, wie das FormbaR Modell benutzt werden kann, um solche Auswirkungen zu analysieren und um Aussagen für ein konkretes Infrastrukturbeispiel zu treffen.

In Ril 408.0611 und Ril 408.0411 wird folgender Fehlerfall beschrieben: Falls ein Blocksignal nicht zurück auf Halt gestellt werden kann, soll folgendes Verfahren ausgeführt werden:

1. Sobald ein Zug am vorangehenden Signal ankommt, werden für die Gleisabschnitte vor und nach dem defekten Signal eine Räumungsprüfung durchgeführt.
2. Der Zug erhält zwei Befehle: Befehl 2, um am dem gestörten Signal vorangehenden Signal vorbei zu fahren und Befehl 14.4, um am gestörten Signal zu halten.
3. Sobald der Zug am defekten Signal ankommt, erhält er Befehl 2, um an diesem Signal vorbei zu fahren.

Der zusätzliche Halt (Befehl 14.4) ist im Regelwerk vorgesehen, ist bei Blocksignalen aber nicht notwendig für die Sicherheit: Die Räumungsprüfung garantiert, dass der Streckenabschnitt frei ist. Im Fall eines Blocksignals deckt er keine Weichen, die eventuell gestellt werden müssen. Unser Modell ermöglicht es in einem konkreten Szenario zu simulieren, wie viel Zeit sich einsparen ließe, wenn der

zweite Halt aus dem Verfahren entfernt würde. Dies ist mit existierenden Simulationstools nicht möglich, da dies ein Eingriff in die Fahrlogik darstellt, nicht in die Infrastruktur.

Wir modellierten eine Kreisstrecke von 22,5 km mit fünf Signalen und einer S-Bahn Baureihe 423 für eine Stunde. Die Abbildungen 2 und 3 sind die entsprechenden v-t Diagramme. Es ist zu sehen, dass der Zug für eine Rundfahrt im Fehlerfall 744 s (Abb. 3) ohne Befehl 14.4 braucht, anstatt 787 s (Abb. 2) mit dem üblichen Verfahren. Dies entspricht 5% weniger Zeit.

4 Ausblick

Erste Ergebnisse zeigen, dass die für Softwaresysteme entwickelten Werkzeuge für die Sprache ABS auch auf unsere bisherige Modellierung des Bahnbetriebs anwendbar sind. Wir planen, die gesamte Richtlinie 408 zu modellieren, insbesondere sämtliche Fehlerfälle, die dort beschrieben sind. Das vervollständigte Modell soll dann mit realen Betriebsdaten verglichen und so validiert werden. Auf Basis des ABS Modells sind Demonstratoren für drei Anwendungsfälle geplant:

1. Wie in Abschnitt 3. beschrieben, sollen Regelwerksverantwortliche ein Werkzeug zur Verfügung gestellt bekommen, dass es ihnen ermöglicht, zu bestimmen ob eine Änderung oder örtliche Abweichung vom bisherigen Regelwerk Safety und/oder Kapazität beeinflusst.
2. Ausgehend von einem ABS Modell, soll bei Änderungen im Regelwerk oder an sicherheitsrelevanten Bauelementen im Stellwerkskern oder der Zugbeeinflussung nicht das gesamte System neu abgenommen werden, sondern ein Werkzeug bereitgestellt werden, welches die Sicherheitsabnahme vereinfacht, indem der Prüfer nur die Änderung abnehmen muss. Dieser Ansatz wird in (Hähnle und Muschevici 2016) beschrieben.
3. ETCS wird durch umfangreiche Lastenhefte und Dokumente spezifiziert, welche von vielen verschiedenen Organisationen und Teilorganisationen entwickelt wurden. Ein einheitliches ABS Modell soll es ermöglichen, automatisch zu prüfen ob die verschiedenen Dokumente, welche die verschiedenen Sichten auf ein Element spezifizieren, konsistent sind, d.h. alle dasselbe Verhalten spezifizieren.

5 Literaturverzeichnis

- Albert, E., Arenas, P., Flores-Montoya, A., Genaim, S., Gómez-Zamalloa, M., Martin-Martin, E., Puebla, G., Román-Diez, G. (2014). SACO: static analyzer for concurrent objects, in: Proc. TACAS, vol. 8413 of LNCS, Springer.
- Din, C. C., Bubel, R., Hähnle, R. (2015). KeY-ABS: A deductive verification tool for the concurrent modelling language ABS, in: CADE, vol. 9195 of LNCS, Springer.
- Hähnle, R., Muschevici, R. (2016). Towards incremental validation of railway systems, in: Leveraging Applications of Formal Methods, Verification and Validation, 7th Intl. Symposium, vol. 9953 of LNCS, Springer.
- Hewitt, C., Bishop, P., Steiger, R. (1973). A universal modular ACTOR formalism for artificial intelligence, Proc. 3rd Intl. Joint Conference on Artificial Intelligence. William Kaufmann.
- Johnsen, E.B., Hähnle, R., Schäfer, J., Schlatter, R., Steffen, M. (2010). ABS: A core language for abstract behavioral specification, in: Proc. Formal Methods for Components and Objects, vol. 6957 of LNCS, Springer.

-
- Kamburjan, E., Hähnle, R. (2017). Uniform modeling of railway operations, in: Proc. Fifth Intl. Workshop on Formal Techniques for Safety-Critical Systems, vol. 694 of CCIS, Springer.
- Misra, J. (1986). Distributed Discrete-Event Simulation, ACM Comput. Surv. 18.
- Pachl, J. (2013). Systemtechnik des Schienenverkehrs: Bahnbetrieb planen, steuern und sichern, Springer Science+Business Media.

Hanno Winter¹, Dr.-Ing. Volker Willert¹, Prof. Dr.-Ing. Jürgen Adamy¹, Dr.-Ing. Michael Leining², Max Spindler³, Dr. rer. nat. Martin Lauer³, Denis Stein⁴, Oliver Heirich⁵, Dr. rer. nat. Jörn Groos⁶, Arne Geffert⁷, Dr.-Ing. Uwe Becker⁷, Dipl.-Ing. Michael Breuer⁸

¹ Fachgebiet für Regelungsmethoden und Robotik, TU Darmstadt

² DB Netz AG

³ Institut für Mess- und Regelungstechnik, Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

⁴ FZI Forschungszentrum Informatik

⁵ DLR Institut für Kommunikation und Navigation

⁶ DLR Institut für Verkehrssystemtechnik

⁷ Institut für Verkehrssicherheit und Automatisierungstechnik, TU Braunschweig

⁸ Institut für Regelungstechnik, RWTH Aachen

Abstract

Dieser Artikel gibt einen Überblick über den aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik beider sicheren Ortung von Schienenfahrzeugen. Des Weiteren wird das Vorhaben Localization Reference Train (LRT) vorgestellt. Dabei handelt es sich um eine Kooperation zwischen mehreren deutschen Forschungsgruppen und der DB Netz AG in der gemeinschaftlich ein Testfahrzeug mit umfangreicher Sensorik ausgestattet wird. Die aufgezeichneten Messdaten dienen vor allem der Entwicklung und Validierung von neuen Ortungsmethoden sowie der Evaluierung bisher unabhängig voneinander evaluierter Methoden auf einer Trägerplattform. Im Folgenden wird die Grundidee, die Zielsetzung sowie der aktuelle Stand des Vorhabens LRT beschrieben.

1 Einleitung

In der Leit- und Sicherungstechnik hat sich das Prinzip des Blockabschnitts zur Sicherung von Zugfahrten nun schon seit mehreren Jahrzehnten bewährt. So gilt der Schienenverkehr als eines der sichersten Verkehrsmittel (Pachl 2016, Maschek 2015). Auf eine Milliarde Personenkilometer kommen in Deutschland 2,7 Verletzte und 0,04 Tote. Dem gegenüber stehen 275,8 Verletzte und 2,93 Tote in Personenkraftwagen (Vorndran 2010). Das Zeitalter der Digitalisierung stellt den Schienenverkehr jedoch vor große Herausforderungen. Die größte davon ist, gegenüber neuen Marktteilnehmern wettbewerbsfähig zu bleiben. In diesem Zusammenhang wird auch an einer neuen Leit- und Sicherungstechnik gearbeitet, die eine günstigere und kapazitätsoptimale Ausnutzung von Strecken ermöglicht (Sennhenn 2015). Der kapazitätsbeschränkende Faktor ist die auf Blockabschnitte beschränkte Ortung von Zügen. Moderne Zugbeeinflussungssysteme wie ETCS ermöglichen zwar eine genauere Ortung, allerdings lohnt der Ausstattungsaufwand von Strecken mit den dafür notwendigen Zusatzeinrichtungen nur für solche mit dichter Zugfolge. Aus diesem Grund wird weiter an neuen Methoden geforscht. Das Ziel ist eine sichere, kontinuierliche und gleisgenaue Ortung von Zügen, die mit möglichst wenigen streckenseitigen Zusatzeinrichtungen auskommt und daher auch für geringer

ausgelastete Strecken wirtschaftlich ist. Im Weiteren wird in diesem Zusammenhang nur noch von einer sicheren Ortung gesprochen. Zur Validierung von neuen Ortungsmethoden sind Versuchsfahrten unter realen Bedingungen unabdingbar. Die Durchführung von Testfahrten ist im Schienenverkehr jedoch nicht ohne weiteres möglich. Dadurch wird die konsequente Entwicklung von neuen Ortungsmethoden über lange Zeiträume fast unmöglich. Aus diesem Grund ist das im Folgenden vorgestellte Vorhaben Localization Reference Train (LRT) entstanden. Es soll die nachhaltige Entwicklung und Validierung von neuen Ortungsmethoden für alle an LRT beteiligten Partner erleichtern. In Abschnitt 2 wird zunächst ein Überblick über den aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik bei der sicheren Ortung gegeben. Die bisherigen Ergebnisse werden in Abschnitt 3 zusammengefasst und anschließend wird das Vorhaben LRT in Abschnitt 4 vorgestellt.

2 Stand von Wissenschaft und Technik

Motiviert durch die Abschaltung der künstlichen Signalverschlechterung (Selective Availability) bei GPS im Jahr 2000 sowie durch den Beschluss zur Entwicklung des europäischen Satellitennavigationssystems Galileo kam es in Europa seit Ende der 90er Jahre zu vielen Forschungsprojekten, die sich vor allem mit einer satellitengestützten sicheren Ortung beschäftigten. Im Projekt RailOrt wurde gezeigt, dass eine satellitengestützte Ortung im Schienenverkehr unter bestimmten Randbedingungen grundsätzlich möglich ist (Bikker et al. 1998). Daneben befasste sich das Projekt APOLO mit der Genauigkeit von verschiedenen GNSS-Empfängern für sicherheitsrelevante Bahnapplikationen. Obwohl damals schon Lokalisierungsgenauigkeiten von unter 1m erreicht wurden, wurde ein weniger schneller Einzug der GNSS-Technologie in sicherheitskritische Bahnanwendungen als in anderen Verkehrsbereichen vorhergesagt, da die Genauigkeiten in schwierigen Betriebssituationen ein ungelöstes Problem blieben (Filip et al 2001, APOLO). In den beiden eng miteinander verbundenen Projekten LOCOPROL und LOCOLOC wurde eine Satellitenortung im Rahmen von ERTMS/ETCS untersucht. Als Hauptproblem wurde dabei die eingeschränkte Sichtbarkeit von Satelliten in städtischen Gebieten festgestellt (Libbrecht und Stureson 2005). Ein neuer Sensor zur Stützung der GNSS-Informationen kam im Projekt DemoOrt zum Einsatz. Dieses beschäftigte sich mit dem Aufbau eines Demonstrators, der durch die Fusion von diversitären fahrzeugautarken Einzelsystemen eine hochgenaue, verlässliche und sichere Ortung ermöglichen sollte. Neben einem GNSS-Empfänger wurde erstmals ein Wirbelstrom-Sensorsystem zur berührungslosen Geschwindigkeitsmessung und Weichenerkennung eingesetzt. Der Demonstrator konnte die Machbarkeit und die Wirtschaftlichkeit einer sicheren Ortung bei verschiedenen Testfahrten zeigen (Meyer zu Hörste et al 2009). Die gleiche Sensorkonfiguration kam später im Rahmen von GaLoROI zum Einsatz. Wohingegen andere Projekte meist nur die Machbarkeit eines satellitengestützten Ortungssystems zeigten, wurde in GaLoROI explizit die Durchführung eines späteren Sicherheitsnachweises berücksichtigt. Die Ortungseinheit kam während eines Langzeittests auf der 8km langen Strecke zwischen Opava východ und Hradec nad Moravicí in der Tschechischen Republik erfolgreich zum Einsatz (Becker 2014).

Weitere Projekte wie SATLOC, 3inSat und ERSAT EAV beschäftigten sich mit der Möglichkeit einer satellitengestützten Ortung im Rahmen von ETCS mithilfe von virtuellen Balisen (Barbu und Marais 2014). Testfahrten im Rahmen von SATLOC konnten das gewählte Konzept bestätigen. Im Fall von ERSAT EAV liegt noch keine abschließende Bewertung der durchgeführten Tests vor, da diese erst vor Kurzem beendet wurden. Ein alternativer Ansatz zur Realisierung von virtuellen Balisen ohne GNSS wird von Nikitin et al. vorgestellt. Das vorgeschlagene System, welches die Position von Zügen mithilfe von Tonfrequenz-Gleisstromkreisen bestimmt, wurde in Russland auf der Strecke Sotschi – Adler

erfolgreich getestet (Nikitin et al. 2016). Neben den bisher erwähnten Projekten gibt es noch eine Vielzahl weiterer.

Eine allgemeine Übersicht über bisherige oder laufende Projekte, zusammen mit den verwendeten Sensoren, wird in Tabelle 1 gegeben.

Tab. 1 Projekte in Europa, die sich mit einer satellitengestützten sicheren Ortung beschäftigen oder beschäftigt haben (ohne Anspruch auf Vollständigkeit)

#	Bezeichnung	Sensoren								Zeitraum
		GNSS	IMU, Gyroskop oder Beschl.-sensor	Odometer	Correvit	Wirbel- stromsensor	Balisen o. ä.	Doppler- radar	Laser- scanner	
1	RailOrt	✓	✓	✓						1997 beendet
2	ALOIS	✓	✓	✓						1999 – 2000
3	APOLO	✓	✓	✓						1999 – 2001
4	SATNAB [16]	✓								unbekannt
5	LOCOPROL	✓		✓			✓			2001 – 2004
6	LOCOLOC	✓		✓			✓			2002 – 2004
7	INTEGRAL	✓	✓	✓						2001 – 2004
8	RUNE	✓	✓	✓				✓		2001 – 2006
9	ECORAIL	✓		✓						2001 – 2006
10	DemoOrt	✓				✓				2004 – 2008
11	GRAIL-1	✓	✓	✓			✓			2005 – 2008
12	POSITRON [17]	✓	✓	✓	✓	✓		✓		unbekannt
13	PiLoNav [18]	✓	✓	✓	✓				✓	2010 – 2014
14	GRAIL-2	✓	✓	✓			✓			2010 – 2013
15	SiPoS-Rail [19]	✓	✓				✓			2011 – 2014
16	GaLoROI	✓				✓				2012 – 2014
17	SATLOC	✓					✓			2012 – 2014
18	3inSat	✓		✓						unbekannt
19	ERSAT EAV	✓								2015 – 2017

Soweit keine andere Quelle angegeben ist, wurde die Auflistung aus den Arbeiten von (Meyer zu Hörste et al. 2009, Böhringer 2008, Lu 2014, Marais 2016) zusammengestellt und teilweise mit zusätzlichen Informationen zur verwendeten Sensorik ergänzt.

3 Schlussfolgerungen aus bisherigen Ergebnissen

Für die weitere Entwicklung einer sicheren Ortung können aus der Vielzahl an Projekten und deren Ergebnissen (vgl. Tabelle 1) wichtige Schlussfolgerungen gezogen werden. Zunächst lassen sich die Probleme bei der Entwicklung einer sicheren Ortung auf die folgenden Punkte reduzieren: 1. Eine Initialposition muss zuverlässig und witterungsunabhängig bestimmt werden. 2. Das aktuell befahrene Gleis sowie Gleiswechsel müssen witterungsunabhängig und zuverlässig detektiert werden. 3. Fahrtrichtung und Geschwindigkeit müssen witterungsunabhängig und zuverlässig detektiert werden. 4. Genauigkeit und Aktualität der digitalen Karte müssen gewährleistet sein. 5. Abschließend muss ein Sicherheitsnachweisgeführt werden.

Bisherige Sensorkonzepte bauen meist auf einer Kombination aus Methoden der Satellitennavigation (GNSS-Empfänger) in Verbindung mit einer Inertial bzw. Koppelnavigation (IMU, Odometer, Correvit-Rail-Sensor, Wirbelstromsensor, Dopplerradar) auf. Dabei sollen sich die Eigenschaften der unterschiedlichen Navigationsverfahren bzgl. absoluter und relativer Ortung sowie kurzzeitiger und langzeitiger Genauigkeit der Positionslösung durch eine Sensordatenfusion optimal ergänzen. In vielen Projekten wird, vermutlich aus Redundanzgründen, nicht ganz auf ETCS-Balisen als weiteres absolutes Ortungssystem verzichtet, da ein längerer Ausfall des GNSS Empfängers sonst nicht mehr kompensiert werden könnte. Die Testergebnisse aller bisherigen Projekte zeigen die prinzipielle Machbarkeit einer sicheren Ortung mit den gewählten Sensorkonzepten. Bezogen auf die weiter oben genannten Probleme bleibt jedoch insbesondere die Detektion von Gleiswechseln ein Problem. Deswegen ist es notwendig über andere Sensorkonzepte nachzudenken. Eine Möglichkeit ist der Einsatz

von optischen Sensoren, d.h. Kameras und/oder Laserscannern. Diese können bisherige Konzepte sowohl durch absolute als auch relative Ortsinformationen unterstützen. Ein Ansatz zur Detektion von Schienen in Laserscannerdaten wird beispielsweise in (Stein et al. 2016) vorgestellt. Aufgrund der aktuellen Entwicklungen im Automobilbereich, wo optische Sensoren immer stärker Einzug halten (Shashua 2016, Ziegler et al. 2014), kann unter Umständen sogar schon auf leistungsstarke Algorithmen zurückgegriffen werden, die sich für den Bahnbereich anpassen lassen. Abschließend lässt sich festhalten, dass die Ergebnisse der bisherigen Projekte weiteren Handlungsbedarf zeigen, um die Genauigkeit und Verfügbarkeit der Ortung zu erhöhen.

4 Das Vorhaben Localization Reference Train

Das Vorhaben Localization Reference Train (LRT) ist ein Zusammenschluss aus verschiedenen deutschen Forschungsgruppen und der DB Netz AG, mit dem Ziel ein gemeinsames Testfahrzeug zur Entwicklung und Validierung von neuen Ortungsmethoden zu realisieren.

4.1 Motivation

Für die Erprobung neuer Sensoren und Sensorsetups sowie zur Gewinnung von Testdatensätzen für die Entwicklung von Ortungsmethoden sind Testfahrten unter realen Bedingungen unabdingbar. Diese können z.B. mit speziellen Forschungsfahrzeugen wie dem Zwei-Wege Fahrzeug RailDrIVE® des Deutschen Zentrum für Luft und Raumfahrt durchgeführt werden (Lüddeke et al. 2012, Lüddeke und Kluge 2014). Vorteil derartiger Forschungsfahrzeuge ist die Möglichkeit zur experimentellen Datenerhebung unter kontrollierten Bedingungen auf realen Strecken sowie die Verfügbarkeit sehr umfangreicher, redundanter und neuester Sensorik. Hauptnachteil derartiger Fahrzeuge ist jedoch die eingeschränkte Einsatzmöglichkeit auf Hauptstrecken, die aus den geringen Geschwindigkeiten von typischerweise unter 50km/h resultiert. Die Validierung neuer Ortungsmethoden setzt jedoch umfangreiche Datensätze voraus, die sämtliche relevanten Umgebungsbedingungen und längere Streckenabschnitte abdecken. Für deren Erhebung sind langfristige Messkampagnen mit Schienenfahrzeugen im operativen Eisenbahnbetrieb notwendig. Die Durchführung solcher ist im Schienenverkehr jedoch nicht ohne weiteres möglich, denn Grundvoraussetzung ist in der Regel eine Kooperation mit einem Schienennetzbetreiber. Zudem muss jede Testfahrt mit dem bestehenden Fahrplan koordiniert werden. Aufgrund dieser Schwierigkeiten ergeben sich die folgenden Einschränkungen bezogen auf die Erforschung einer sicheren Ortung: 1. Im Vergleich zu anderen Forschungsgebieten ist es sehr aufwändig eigene Ortungsmethoden und -algorithmen in der Praxis zu validieren. Das schränkt den Kreis derjenigen ein, die sich effektiv mit den Problemen einer sicheren Ortung beschäftigen können. 2. Der Testzeitraum ist in der Regel zeitlich begrenzt, da nach dem Abschluss der Finanzierung von Forschungsprojekten in der Regel auch die Kooperation mit dem Schienennetzbetreiber endet. Die konsequente Weiterentwicklung von Ortungskonzepten wird somit behindert. 3. Neben der zeitlichen Beschränkung ist auch das Testgebiet auf das Netz des beteiligten Schienennetzbetreibers beschränkt. Zusammen ergibt sich daraus, dass Testfahrten unter verschiedenen klimatischen und räumlichen Bedingungen kaum realisiert werden können. An dieser Stelle setzt LRT an. Durch den Zusammenschluss von verschiedenen deutschen Forschungsgruppen und der DB Netz AG sollen die oben genannten Beeinträchtigungen bei der Erforschung einer sicheren Ortung für alle Beteiligten reduziert werden. Dazu soll

gemeinschaftlich ein Testfahrzeug mit Sensorik ausgestattet werden. Die damit erfassten Messdaten können dann von allen Beteiligten unabhängig voneinander genutzt werden. Dieses Vorgehen ist aus den folgenden Gründen von Vorteil:

- Bei einer gemeinschaftlichen Realisierung reduziert sich der organisatorische, materielle und finanzielle Aufwand für jeden Einzelnen. Zu Beginn ist zwar mit einer aufwändigeren Abstimmungs- und Planungsphase zu rechnen, doch langfristig sollten die im Weiteren genannten Vorteile überwiegen.
- Durch die gemeinschaftliche Ausstattung des Testfahrzeugs mit Sensorik wird diese deutlich vielfältiger ausfallen, als es jedem Einzelnen bei der Ausstattung eines eigenen Testfahrzeugs möglich gewesen wäre. Dies erlaubt es, verschiedenste Ortungsmethoden zu testen, direkt miteinander zu vergleichen und im Hinblick auf einen noch zu führenden Sicherheitsnachweis zu bewerten.
- Da das Vorhaben zusammen mit der DB Netz AG, dem größten deutschen Schienennetzbetreiber, geplant ist, kann davon ausgegangen werden, dass eine langfristige Kooperation möglich ist. Auf diese Weise wird eine nachhaltige Forschung an einer sicheren Ortung möglich und es können zeitliche und räumliche Effekte untersucht werden.
- Das Vorhaben trägt zu einer besseren Vernetzung der Forschungsgruppen bei, fördert den wissenschaftlichen Diskurs zum Thema der sicheren Ortung und kann somit dabei helfen, dass eine sichere Ortungslösung gefunden wird. Somit hat LRT das Potential die Forschung an einer sicheren Ortung in Zukunft schneller und nachhaltig voranzubringen.

4.2 Hintergründe

Die Idee für das Vorhaben LRT entstand Mitte des Jahres 2016. Sie ging aus Gesprächen zwischen der Forschungsgruppe des Fachgebiets Regelungsmethoden und Robotik (rmr) der TU Darmstadt und des Instituts für Mess- und Regelungstechnik (mrt) am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) hervor¹². Dabei wurden die weiter oben genannten Probleme bei der Erforschung einer sicheren Ortung thematisiert. Es wurde beschlossen im Rahmen der Innovationsallianz (TU Darmstadt 2017, DB AG 2017) zwischen der DB und der TU Darmstadt ein Testfahrzeug zu schaffen, an dem sich dann auch das mrt beteiligt. Es zeigte sich schnell, dass sich auch weitere deutsche Forschungsgruppen an LRT beteiligen möchten. Die Abkürzung „Localization Reference Train“ bezeichnet zunächst das ganze Vorhaben um die zur Entwicklung und Validierung von Ortungsmethoden (Localization) notwendigen Messdaten (Reference) mit einem Testzug (Train) zu generieren. Sie kann aber auch als Bezeichnung des Testfahrzeugs an sich verstanden werden.

4.3 Aktueller Stand

Nach aktuellem Stand beteiligen sich die folgenden Partner an LRT:

- DB Netz AG
- Fachgebiet Regelungsmethoden und Robotik (TU Darmstadt)
- Institut für Mess- und Regelungstechnik (KIT)

² Am mrt besteht schon seit geraumer Zeit eine Gruppe, die sich mit der Ortung von Zügen beschäftigt (Railway Localization Group), wohingegen die Forschung auf diesem Gebiet am rmr erst im April 2016 im Rahmen der Innovationsallianz zwischen der DB und der TU Darmstadt etabliert wurde (TU Darmstadt 2017, DB AG 2017).

- FZI Forschungszentrum Informatik (Karlsruhe)
- Institut für Verkehrssicherheit und Automatisierungstechnik (TU Braunschweig)
- Institut für Regelungstechnik (RWTH Aachen)
- Institut für Kommunikation und Navigation (DLR Oberpfaffenhofen)
- Institut für Verkehrssystemtechnik (DLR Braunschweig)

Wie im folgenden Abschnitt 4.3.1 genauer beschrieben wird, laufen zurzeit Gespräche, um ein passendes Testfahrzeug sowie eine Teststrecke zu finden. Außerdem wird in Abschnitt 4.3.2 näher auf den aktuellen Stand des geplanten Messsystems eingegangen.

4.3.1 Testfahrzeug und -strecke

Das Testfahrzeug und die Teststrecke werden in Absprache mit der DB Netz AG ausgesucht. In den Tabellen 2 und 3 werden die gemeinsam erarbeiteten Anforderungen an das Testfahrzeug und die Teststrecke kurz zusammengefasst. Aktuell wird in Gesprächen mit einem regionalen Netzbetreiber geprüft, inwieweit sich die gewünschten Anforderungen umsetzen lassen.

Tab. 2 Gewünschte LRT-Anforderungen an das Testfahrzeug mit Relevanz („+“ = unabdingbar, „o“ = wenn möglich).

#	Anforderung an das Testfahrzeug	Relevanz
A1	Zulassung als Eisenbahnfahrzeug	+
A2	Wettergeschützter Raum, in dem das System zur Messdatenerfassung untergebracht werden kann	+
A3	Vorhandensein einer elektrischen Energieversorgung für die Messtechnik	+
A4	Befestigung von Sensoren direkt am Fahr-/Drehgestell, dem Fahrzeugboden oder den Frontseiten des Zuges	+
A5	Geschwindigkeiten von 80–160 km/h	o

Tab. 3 Gewünschte LRT-Anforderungen an die Teststrecke mit Relevanz („+“ = unabdingbar, „o“ = wenn möglich).

#	Anforderung an die Teststrecke	Relevanz
A1	Wiederholbare Befahrbarkeit	+
A2	Geschwindigkeiten von 80–160 km/h	o
A3	Anspruchsvolle Umgebungsbedingungen in Form von Tunneln, Bahnsteigdächern, Vegetation, Bahnübergängen usw.	o
A4	Rangierfahrten bis 30 km/h mit häufigen Richtungswechseln und vielen parallelen Gleisen	o
A5	Mehrere hundert Kilometer Distanz zwischen Start und Ziel	o
A6	Vorhandensein von Kartenmaterial	o

4.3.2 Messsystem

In Tabelle 4 sind die verschiedenen Sensortypen aufgelistet, die derzeit für das Testfahrzeug zur Verfügung stehen. Die verschiedenen Sensoren machen es möglich Verfahren der Satelliten-, Inertial- und Koppelnavigation zu erproben. Darüber hinaus können mithilfe des LiDARs und den Kameras

verschiedene Merkmale entlang der Strecke detektiert werden. Diese können beispielsweise zur Erkennung von Gleiswechseln genutzt werden. Die Stereokamera erlaubt es außerdem eine Lokalisierung mittels visueller Odometrie zu erproben. Im weiteren Verlauf des Vorhabens können auch Sensoren wie z.B. ein GSM-Modul, ein Dopplerradar, ein Radimpulsgeber und/oder ein RFID-System hinzukommen.

Tab. 4 Verfügbare Sensoren für das LRT-Testfahrzeug

Typ	Messgröße(n)
GNSS	Position
IMU	Beschleunigungen, Drehraten, (Magn. Flussdichte)
DIS ²	Geschwindigkeit
Correvit-Rail-Sensor	Geschwindigkeit
LiDAR	Distanz, Echo
Stereokamera	Bilddaten

Aktuell noch nicht endgültig geklärt ist die Ausführung des Systems zur Messdatenerfassung. Angestrebt wird der Aufbau eines modularen Systems, das aus einer dauerhaften Basiskonfiguration besteht und sich bei Bedarf einfach erweitern lässt. Die wichtigste Anforderung an das System ist jedoch eine synchrone Erfassung bzw. Zeitstempelung aller Messdaten, da dies die Grundlage für jede anschließende Sensordatenfusion in Ortungsalgorithmen ist. Weiterhin muss das System in der Lage sein, den kompletten Messdatenstrom in Echtzeit zu verarbeiten und die aufgezeichneten Messdaten sollen von jedem möglichst einfach interpretiert werden können, wobei der eigentliche Prozess der Messdatenerfassung für jeden transparent sein muss. In den teilnehmenden Forschungsgruppen bestehende Systeme können nicht direkt übernommen werden, da diese in der Regel spezielle Hard- und Software sowie spezielles Know-how zur Bedienung benötigen und somit die genannten Anforderungen nicht erfüllen. Deswegen wird zum einen geprüft, wie bestehende Systeme möglichst einfach genutzt werden können, um die oben genannten Anforderungen zu erfüllen und zum anderen wird ein neues System unter Verwendung des Robot Operating System (ROS) (ROS.org 2017) getestet. Das gesamte Messsystem bestehend aus Sensorik und 2Difference-Inductance-Sensor (Spindler et al 2016) Messdatenerfassung ist in Abbildung 1 skizziert. Zusätzlich zeigt Abbildung 2 in der Frontansicht auch mögliche Montagepositionen der optischen Sensoren (Stereokamera und LiDAR). Die genaue Montage auf dem späteren Testfahrzeug hängt jedoch von diesem, noch zu findenden, ab. Dabei ist es auch denkbar, das gesamte Messsystem auf einer eigenen Plattform zu fixieren, die sich auf einer Kupplung des Zuges montieren lässt.

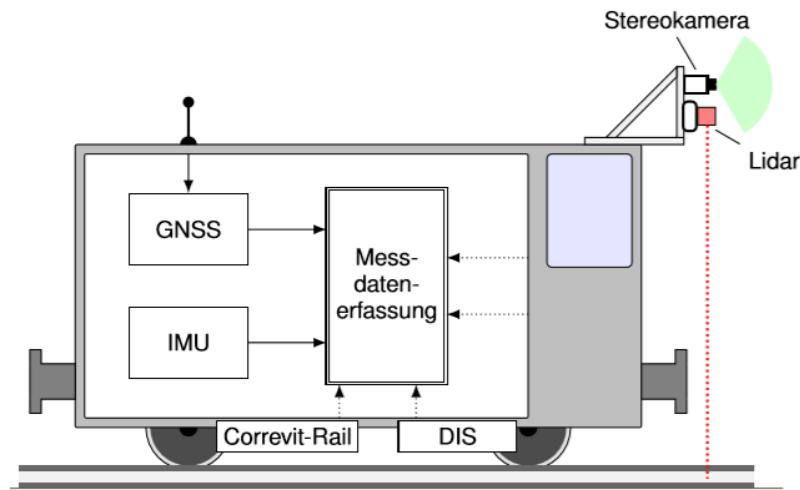


Abb. 1 Beispielhafte schematische Darstellung der Sensoren und der Messdatenerfassung auf dem Testfahrzeug (Seitenansicht).

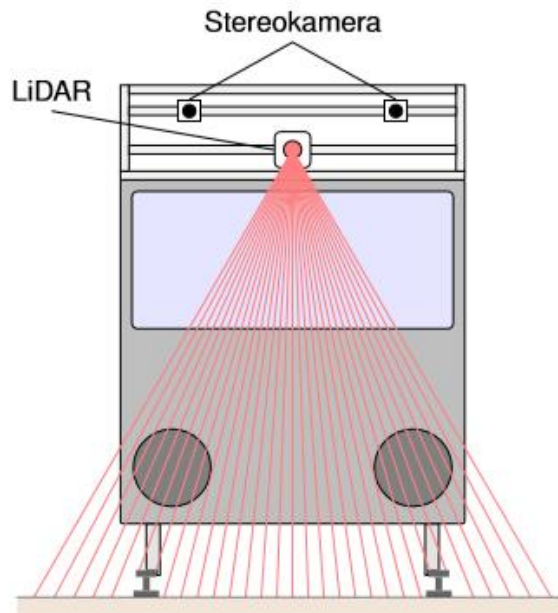


Abb. 2 Beispielhafte schematische Darstellung der Anbringung des LiDAR und der Stereokamera auf dem Testfahrzeug (Frontansicht).

5 Zusammenfassung

Die Ergebnisse aus bisherigen Forschungsarbeiten zeigen, dass eine sichere Ortung prinzipiell machbar ist. Um jedoch die bestehende Leit- und Sicherungstechnik ersetzen zu können, müssen die gefundenen Konzepte noch weiterentwickelt und validiert werden. Die Durchführung von Testfahrten zur Validierung von neuen Ortungsmethoden für den Schienenverkehr ist jedoch nicht ohne weiteres möglich. Das Vorhaben LRT hilft dabei, dies für alle Beteiligten in Zukunft leichter zu gestalten. Außerdem entstehen durch die Zusammenarbeit mehrerer Forschungsgruppen und der DB Netz AG langfristige Synergien, die dazu beitragen können die Forschung an einer sicheren Ortung schneller und nachhaltig voranzubringen.

Aus den bisherigen Gesprächen zur Abstimmung zwischen allen Beteiligten entstand unter anderem ein Lastenheft, anhand dessen zurzeit nach einem geeigneten Testfahrzeug und einer Teststrecke gesucht wird. Es wird erwartet, dass das erste LRT-Testfahrzeug im Laufe dieses Jahres (2017) zur Verfügung steht. Ein geeignetes System zur Messdatenerfassung wird aktuell konzipiert. Die für das Testfahrzeug benötigte Sensorik zur Erprobung verschiedenster Ortungsverfahren ist jedoch bereits vorhanden. Bis alle Anforderungen erfüllt werden können sind jedoch vermutlich mehrere Iterationen notwendig. Außerdem wird ein Benchmark angestrebt, mithilfe dessen die Entwicklung von sicheren Ortungsmethoden einem breiteren Publikum zugänglich gemacht werden kann. Diese Vorgehensweise wird in der Automobilbranche bereits erfolgreich angewandt (Geiger et al. 2012). LRT hat somit das Potential die Entwicklung und Validierung von neuen Ortungsmethoden für sicherheitskritische Anwendungen im Schienenverkehr langfristig mit realen Messdaten zu unterstützen.

6 Literaturverzeichnis

- APOLO Advanced Position Locator System. [http:// cordis . europa . eu / telematics / tap _ transport / research/projects/apolo.html](http://cordis.europa.eu/telematics/tap_transport/research/projects/apolo.html).
- Barbu, G., Marais, J. (Apr. 2014). The SATLOC project. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00987106>.
- Becker, U. (2014). GaLoROI Galileo Localisation for Railway Operation Innovation – Final Report. http://www.galoroi.eu/wp-content/uploads/2016/09/GaLoROI_Final-Report.pdf.
- Bikker, G., et al. (Feb. 1998) Rail Ort - Ortung im spurgebundenen Verkehr auf der Basis von Satelliten-Navigation. In: ETR - Eisenbahntechnische Rundschau 47, S. 172–175.
- Böhringer, F. (2008). Gleiselektive Ortung von Schienenfahrzeugen mit bordautonomer Sensorik. Diss. Institut für Mess- und Regelungstechnik, Universität Karlsruhe (TH).
- Däubler, L., Bikker, G., Schnieder, E. (2002). SATNAB - Satellitengestütztes Navigations-Bodenexperiment. In: Signal + Draht 6.
- DB AG (Feb. 2017). Innovationsallianz DB AG TU Darmstadt. <http://www1.deutschebahn.com/innovationsallianz>.
- Eickmann, C., Gerlach, K. (2008). Fahrzeugseitiges Ortungssystem für den sicheren Bahnbetrieb. In: EI - Der Eisenbahningenieur 8, S. 30–34.
- Filip A., Mocek, H., Bazant, L. (2001). Zugortung auf GPS/GNSS-Basis für sicherheitskritische Anwendungen. In: SIGNAL + DRAHT 5, S. 16–21.
- Geiger, A., Lenz, P., Urtasun R. (2012). „Are we ready for Autonomous Driving? The KITTI Vision Benchmark Suite“. In: IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR).
- Libbrecht, R., Stureson, H. (Juni 2005). LOCOPROL Final Report. <http://www.transport-research.info/project/low-cost-satellite-based-train-location-system-signalling-and-trainprotection-low-density>.
- Lu, D. (2014). „GNSSforTrainLocalisationPerformanceEvaluation and Verification“. Diss. Fakultät für Maschinenbau, Technische Universität Braunschweig, 2014.
- Lüddecke, K., Kluge A. (2014). Mobiles Labor RailDrIVE – synchrone Erfassung von Sensordaten. In: EI - Der Eisenbahningenieur 1, S. 46–49.

-
- Lüddecke, K., Rahmig, C., Lemmer, K. (2012). „Hochgenaue und integrale Ortung für den Schienenverkehr der Zukunft“. In: EI - Der Eisenbahningenieur 9, S. 72– 75.
- Marais, J. (2016). GNSS et Rail : Où en est-on? <http://www.guide-gnss.net/contenuguide/uploads/2016/03/160315-RIM-IFSTTAR-JMarais.pdf>.
- Maschek, U. (2015). Sicherung des Schienenverkehrs. Springer Fachmedien Wiesbaden.
- Meyer zu Hörste, M. et al. (Dez. 2009). Berichte aus dem DLR-Institut für Verkehrssystemtechnik, Band 8, Entwicklung eines Demonstrators für Ortungsaufgaben mit Sicherheitsverantwortung im Schienengüterverkehr (DemoOrt), Abschlussbericht der Phasen 1 und 2. Techn. Ber. DLR Institut für Verkehrssystemtechnik.
- Nikitin, A. et al. (2016) „Die Bestimmung der Positionen von Zügen mithilfe der Tonfrequenz-Gleisstromkreise“. In: Signal + Draht 7+8, S. 29–34.
- Pachl, J. (2016). Systemtechnik des Schienenverkehrs. Springer Fachmedien Wiesbaden.
- ROS.org (Feb. 2017) | Powering the world's robots: <http://www.ros.org/>.
- Rütters, R. M. (2014). Autonome Positionsbestimmung von Schienenfahrzeugen unter Verwendung differentieller GNSS-Verfahren. Fortschrittberichte VDI: Reihe 8, Mess-, Steuerungs- und Regelungstechnik; Nr. 1239.
- Sennhenn, F. (Okt. 2015). Infrastruktur 4.0 – Digitalisierung bei DB Netz. In: EI - Der Eisenbahningenieur, S. 3.
- Shashua, A. (2016). Keynote: Autonomous Driving, Computer Vision and Machine Learning. In: Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR).
- Spindler, M., Stein, D., Lauer, M. (Aug. 2016). „Low power and low cost sensor for train velocity estimation“. In: IEEE International Conference on Intelligent Rail Transportation (ICIRT), S. 259–264.
- Stein, D., Spindler, M., Lauer, M. (Juni 2016). „Model-based rail detection in mobile laser scanning data“. In: IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV), S. 654–661.
- TU Darmstadt (Feb. 2017). Innovationsallianz TU Darmstadt / Deutsche Bahn AG. http://www.verkehr.tu-darmstadt.de/bs/bahnsysteme/kooperation__db/kooperation/.
- Vorndran, I. (Dez. 2010). Unfallstatistik–Verkehrsmittel im Risikovergleich. In: Auszug aus der Publikation "WISTA – Wirtschaft und Statistik“.
- Ziegler, J. et al. (2014). Making Bertha Drive—An Autonomous Journey on a Historic Route. In: Intelligent Transportation Systems Magazine 6, S. 8–20.

Abstract

In den folgenden Ausführungen wird ein generischer Ansatz der Fahrzeugbewegungssicherung vorgestellt. Die Idee besteht darin, losgelöst von den Erfahrungen der konkreten technischen Lösungen die Funktionen der Fahrzeugbewegungssicherung eindeutig algorithmisch zu beschreiben. Es sollen alle diejenigen Funktionen beschrieben werden, die in den einzelnen Funktionsmodulen in künftigen Architekturen realisiert werden. Das können sowohl die zentralen als auch die dezentralen Elemente der Fahrwegsicherung sein; gegebenenfalls auch Fahrzeugtechnik sowie Nahtstellen der benachbarten Gebiete.

1 Motivation

Für die sicherheitsrelevanten Prozesse im Schienenverkehr sorgt die Bahnsicherungstechnik. Die Entwicklung und Weiterentwicklung war immer durch die technischen Möglichkeiten der jeweiligen Zeit bestimmt. Heute bedeutet Bahnsicherungstechnik mehr als ein Stellwerk. Sie umfasst Technik zur Fahrwegsicherung, Technik der Zugbeeinflussung und Anlagen der Bahnübergangssicherung. Die Weiterentwicklung der Bahnsicherungstechnik liegt in der technologischen Umsetzung der funktionalen Anforderungen. (Bachurina und Trinckauf 2016)

Die Anforderungen an die Bahnsicherungstechnik sind in der Vergangenheit überwiegend empirisch entstanden. Die bisherigen Entwicklungen richteten sich nach der zum jeweiligen Zeitpunkt vorhandenen Technik. Daher ist eine Inkompatibilität unter Systemen für die Bahnsicherungstechnik entstanden. Wobei *„eine sichere Zugfahrt nur Signalabhängigkeit, Folgefahrerschutz und Gegenfahrerschutz erfordert.“* (Trinckauf 2011) Es stellt sich die Frage, ob länderunabhängige Lösungen nicht anzustreben wären.

Ein anderes Problem ist die Spezifikation der sicherungstechnischen Systeme. Angefangen von der Mechanik bis hin zur Relaisstechnik erfolgte die Funktionsbeschreibung abhängig von der technischen Realisierung. Das hatte seine Begründung und seine Berechtigung darin, dass anhand der technischen Unterlagen die Funktionen für den Fachmann klar ersichtlich waren. Demzufolge wurde das Nachdenken über Funktionen auf einer abstrakten, implementierungsunabhängigen Ebene vernachlässigt, sowohl beim Betreiber, als auch bei den Lieferanten (Koch 1997). So wurden die lageplanspezifischen Anpassungen an dem Einsatzfall von Hebelstellwerken ausreichend in einem Verschlussplan gefasst. Beim Übergang zu Relaisstellwerken wurden die Funktionalitäten eines Hebelstellwerks in Relaischaltungen umgesetzt. Bald nach der Inbetriebnahme der ersten Verschlussplanstellwerke entstanden Versuche mit Spurplantechnik. Die Logik, die der Verschlussplan zugrunde liegt, wird bei Spurplanstellwerken selbst realisiert und bei jeder Einstellung einer Fahrstraße entsprechend der Lage der befahrenen Elemente im Gleisplan erneut abgerufen und ausgeführt. Die Logik dieser Relaischaltungen diente später als Basis für die Entwicklung der Software von elektronischen Stellwerken (ESTW) und für die Funktionsbedingungen des technischen Lastenheftes für ESTW.

Im Grunde genommen verfolgt jedes Land im Bereich der Bahnsicherungstechnik ein allgemeines Ziel: Die sichere Beförderung von Personen und den sicheren Transport von Gütern. Die Grundfunktionen der Bahnsicherungstechnik sind im Kern meist über lange Zeit stabil, da sich die zu steuernden Prozesse, die auf physikalischen Grundsätzen des Schienenverkehrs basieren, nicht geändert haben (Maschek 2014). Daher bietet es sich an, lediglich einmal eine generische Beschreibung der Systemfunktionalität auf einem bestimmten Abstraktionsniveau zu erstellen.

Um der Unabhängigkeit der Funktionsbeschreibung von einer Systemarchitektur gerecht zu werden, wird der Begriff „Fahrzeugbewegungssicherung“ eingeführt. Damit soll deutlich gemacht werden, dass darunter die Aktionen und Reaktionen unter betrieblichen und technologischen Gesichtspunkten zu verstehen sind. Damit soll auch in erster Näherung eine Abgrenzung zu anderen funktionalen Systemen vorgenommen werden. Abgrenzung bedeutet aber auch, dass die Nahtstellen zu den anderen Teilen des Bahnsystems bestehen und Berücksichtigung finden müssen.

2 Generationen der Bahnsicherungstechnik

Im Laufe der Geschichte hat die Menschheit mindestens drei industrielle Revolutionen erlebt. Diese Revolutionen sind durch bestimmte technische Erfindungen gekennzeichnet und haben neue Entwicklungen in vielen Branchen mit sich gebracht. Die Entwicklung von Stellwerken, die den Kern der heutigen Bahnsicherungstechnik darstellen, hielt im Laufe der Jahre immer Schritt mit der allgemeinen technischen Entwicklung. Die Stellwerkstechnik kennt mit dem heutigen Tag mindestens vier Generationen. Beginnend mit den einfachen Schlüsselabhängigkeiten, über Kurbelwerke, mechanische, elektromechanische und Relaisstellwerke schritt die Entwicklung bis zu elektronischen Stellwerken fort.

Die Technologie der elektronischen Stellwerke geht auf die Relaisstechnik der 1950er Jahre zurück. Der Grundbaustein hierfür war das Signalrelais, das logische Funktionen realisieren kann. Nachteilig war dabei der Preis. Es ist allgemein bekannt, dass die logischen Funktionen – ohne Berücksichtigung der Sicherheit – wesentlich wirtschaftlicher von elektronischen Rechnern ausgeführt werden können. Hindernis für einen Technologiewechsel waren die hohen Anforderungen an die Sicherheit bei der Bahn (Maschek 2014). Mit der Entwicklung der Rechnertechnik und somit der Einführung der elektronischen Stellwerke fand der große Technologiewandel in der Bahnsicherungstechnik statt.

Seit einiger Zeit ist die Digitalisierung und Vernetzung über Datenbusse im Bereich des Schienenverkehrs ein Schwerpunktthema in Fachbeiträgen und Fachdiskussionen geworden. Erleben wir heute einen neuen Technologiewandel? In der Bahnsicherungstechnik mit der Kernaufgabe Sicherheit ist das Bemühen um technologischen und technischen Fortschritt erst in Ansätzen erkennbar. Haupthindernis ist eine Eisenbahnbetriebstechnologie, die vor etwa 150 Jahren entwickelt wurde und nahezu unverändert auch noch heute in den moderneren Systemlösungen abgebildet wird. Hinzu kommt, dass nationale Besonderheiten und Befindlichkeiten sowie historische Entwicklungen eine wirkliche Innovation behindern. (Bachurina und Trinckauf 2016) Trotzdem sind *„inzwischen neue technische Lösungen, die von Elektronik, Computertechnik und netzweiter Datenkommunikation inspiriert werden, in unseren über Jahrzehnte gewachsenen sicherungstechnischen Systemen vorhanden. Es steht außer Frage, dass das auch gut funktioniert.“* (Trinckauf 2015)

Die allgemeine Technologieentwicklung im Bereich sowohl bei der Datenübertragung und Ortung als auch bei der Vernetzung und Verteilung technischer Intelligenz hat in den Kernzonen der Bahnsicherungstechnik bisher nur ansatzweise Anwendung gefunden. Das Erfordernis, neue Technologien und technische Lösungen in der Bahnsicherungstechnik einzuführen, besteht zweifellos.

Das zieht neue Denkansätze bei der funktionalen und technischen Architektur nach sich. Diese Änderungen und neue Entwicklungen werden, wenn nicht zur Revolution, mindestens zu einer neuen Generation der Bahnsicherungstechnik führen. Schlussfolgernd lassen sich folgende Anforderungen an eine neue Generation der Bahnsicherungstechnik formulieren:

- Verzicht auf nicht zwingend erforderliche Funktionalitäten
- Vereinheitlichung der Funktionen
- Standardisierung der technischen Architekturen
- Modularisierung der Systeme

3 Ansätze der Standardisierung

Im Rahmen der wissenschaftlichen Untersuchungen wurde eine Recherche der wissenschaftlichen Arbeiten durchgeführt, die sich mit dem Thema Fahrzeugbewegungssicherung direkt oder indirekt beschäftigt haben. Dabei können die Ergebnisse wie folgt zusammengefasst werden:

3.1 Bahnbetriebsprozess

An erster Stelle steht der Bahnbetriebsprozess mit den systemtypischen Eigenschaften. Das Problem der Harmonisierung der betrieblichen Regeln beschäftigt die Wissenschaftler und Fachexperten schon lange. Einen wesentlichen Beitrag zur Aufklärung dieser Problematik hat Pachl in seinen zahlreichen Arbeiten geleistet. Unter anderem sind Beiträge wie „Betriebsverfahren im internationalen Vergleich“ (Pachl 2008 a), „Die Bedeutung betrieblicher Regelwerke für die Leit- und Sicherungstechnik“ (Pachl 2008 b), „Betriebssicherheitliche Regelwerke im internationalen Vergleich“ (Pachl 2012) zu nennen. Diesem Thema wurden auch Dissertation wie von Bosse (Bosse 2012) und Hoeppner (Hoeppner 2015) gewidmet.

Alle Eisenbahnen basieren auf fundamentalen Eigenschaften wie Spurführung und lange Bremswege durch geringe Haftreibung im System „Stahlrad auf Stahlschiene“. Darauf beruhend hat Hoeppner eine Basis für ein harmonisiertes Betriebsverfahren geschaffen. Ein entscheidendes Hindernis bei der Harmonisierung der betrieblichen Regeln ist jedoch das Nichtvorhandensein einer einheitlichen Eisenbahnfachsprache zum einen und zum anderen die in natürlicher Sprache verfassten Regelwerke. Um betriebliche Interoperabilität zu erreichen, sollen weitere Schritte ausgehend von Vorüberlegungen Bosse und Hoeppner erfolgen. (Hoeppner 2015)

3.2 Anforderungen

Abgeleitet aus dem Bahnbetriebsprozess entstehen Anforderungen, die sicherungstechnisch umgesetzt werden müssen. Die Kernanforderungen an die Fahrzeugbewegungssicherung gehören an diese Stelle.

Versuche, die funktionalen Anforderungen an die Bahnsicherungstechnik zu harmonisieren, gab es viele. Mit der Zielsetzung der Harmonisierung der funktionalen Anforderungen der Stellwerkstechnik wurden beispielsweise Projekte wie ERRI A 201, Eurointerlocking, INESS (Integrated European Signalling) durchgeführt.

Der entscheidende Unterschied dieser Projekte von dem hier beschriebenen Vorhaben ist die Betrachtungsebene. Die INESS-Anforderungen gehen beispielsweise sehr detailliert auf die oft historisch gewachsenen Besonderheiten der Bahnsicherungstechnik in den untersuchten Ländern ein. Somit

erfolgt keine Unterscheidung zwischen den Anforderungen, die durch die jeweiligen Betriebsweisen zustande kommen, und den Anforderungen, die sich aus den technischen Besonderheiten ergeben.

Ausgehend von den Ergebnissen dieser Projekte, kann festgestellt werden, dass die Abbildung aller nationalen Anforderungen die Komplexität der Beschreibung deutlich erhöht. Auf einem hohen Abstraktionsniveau ist es allerdings denkbar.

Einen wesentlichen Beitrag zur Beschreibung allgemeingültiger Anforderungen hatten Maschek, Trinckauf und Theeg in (Maschek 2009, Trinckauf 2013, Theeg 2010) geleistet. Basierend auf diesen Vorüberlegungen ist das Ziel des neuen Ansatzes, einen übergeordneten allgemeingültigen Algorithmus zu entwickeln. Bei der Umsetzung in konkrete Systeme sind die detaillierteren Anforderungen der einzelnen Länder zu berücksichtigen.

3.3 Technologie

Technologie beschreibt, wie die sicherungstechnischen Anforderungen prozedural umgesetzt werden bzw. welche logischen Zusammenhänge zwischen funktionalen Anforderungen bestehen. Dazu gehören sehr maßgeblich die Funktionalitäten der Fahrzeugbewegungssicherung.

Die funktionalen Anforderungen der Bahnsicherungstechnik und deren Zusammenhänge lassen sich gut in einem Regelkreis darstellen (Abb. 1).

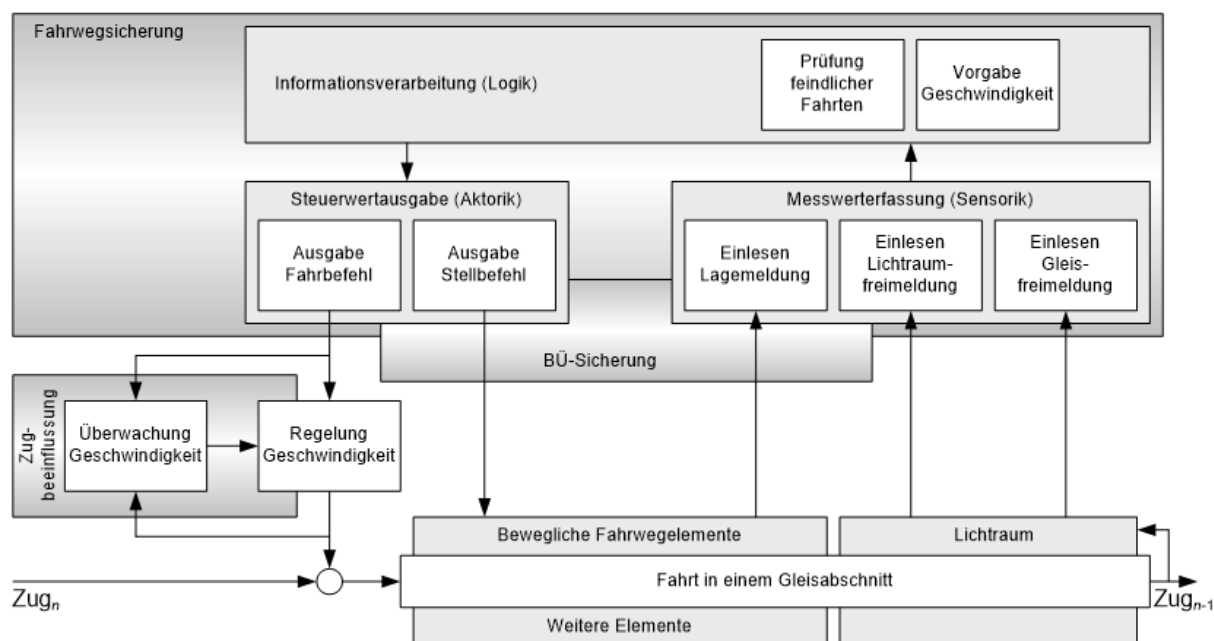


Abb. 1 Regelkreis der Bahnsicherungstechnik

Quelle: (Maschek 2014)

Dieser Regelkreis ist in seiner ursprünglichen Form in den 1950er Jahren von Potthoff in (Potthoff 1958) kreiert und seither ständig weiterentwickelt worden. Er eignet sich gut für eine technikenunabhängige Erklärung der sicherungstechnischen Vorgänge im Bahnbetrieb. Eine weitergehende Verfeinerung wurde von Trinckauf und Maschek in (Maschek 2014) und (Fenner et al. 2003) vorgenommen.

Ausgehend vom Regelkreis und basierend auf den sicherungstechnischen Anforderungen hat Theeg in seiner Arbeit (Theeg 2010) die Technologien der Bahnsicherungstechnik auf internationaler Ebene miteinander verglichen.

Bei den technischen Verfahren wurden folgende logische Grundprinzipien identifiziert:

- Elementabhängigkeiten
- Prinzip „Fahrstraße“ (Sicherung von Fahrzeugbewegungen hauptsächlich im Bahnhof)
- Prinzip „Blockinformation“ (Sicherung von Fahrzeugbewegungen auf der freien Strecke)

Diese drei Prinzipien werden international in unterschiedlichem Maße sowohl einzeln als in Kombination angewandt. (Theeg 2010)

Die aus historischen Gründen entstandene Unterscheidung zwischen Fahrstraßen- und Blocksystemen ist heute hinfällig. Sicherung mit Fahrstraßen ist seit der Einführung der technischen Mittel zur Gleisfreimeldung universell anwendbar sowohl für die Sicherung im Bahnhof als auch auf der freien Strecke. (Maschek 2014, Theeg 2010) Mit ESTW sind die Bereiche Bahnhof und Strecke grundsätzlich integriert; jedoch bestehen bei den Funktionen weiterhin unterschiedliche Verfahren (Zoeller 2002).

Die Aufhebung der bisherigen Unterscheidung zwischen zwei Technologien der Sicherung von Fahrzeugbewegungen hätte keine große Auswirkung auf sicherungstechnische Prozesse; auf die betrieblichen Prozesse bei der Durchführung von Fahrzeugbewegungen jedoch erhebliche, denn das bedeutet die Aufhebung der Unterscheidung zwischen Bahnhof und freier Strecke. Nichtsdestotrotz würde eine generische Technologie langfristig eine Grundlage für die Harmonisierung der heutigen betrieblichen Regeln und eine Grundlage für einheitliche Bahnsicherungstechnik schaffen. Die einheitliche Bahnsicherungstechnik würde aufwändige Schnittstellen wegfallen lassen, Kosten sparen und einen echten Wettbewerb der Systemlieferanten ermöglichen. Der Anspruch des neuen Ansatzes ist die Entwicklung einer generischen Technologie zum Sichern von Fahrzeugbewegungen.

3.4 Technik

Technik beschreibt die Realisierung der Technologien durch technische Systeme, Teilsysteme und Komponenten. Die technischen Lösungen sind vielfältig und unterscheiden sich international sehr stark. Die Verwendung der elektronischen Bauteile bietet die Möglichkeiten der Modularisierung sicherungstechnischer Hardware. Anstelle von Spezialbauteilen können standardisierte Komponente universell verwendet werden. (Theeg 2010)

Einen innovativen Vorschlag für eine alternative technische Umsetzung der heutigen Stellwerksfunktionen hat Pasternok in seiner Dissertation „Selbstkonfigurierendes dezentrales Steuerungssystem für Bahnen“ (Pasternok) gemacht. Die Hauptidee besteht in der Entwicklung eines rechnergestützten Spurplanstellwerks und somit in der Verlagerung Stellwerksfunktionen auf die einzelnen dezentralen Module. Zu dem Entstehungszeitpunkt dieser Arbeit war die dafür passende Technik noch nicht reif, um eine Anwendung zu realisieren. Heute wäre es durchaus möglich.

Es sind viele Ansätze bekannt, die sich mit der Standardisierung der Schnittstellen beschäftigen, wie Stellwerk Interface Standard (SwISS) (Wagner et al. 2012), Neuausrichtung der Produktionssteuerung (NeuPro) (Elsweiler und Bänsch 2012), European Initiative Linking Interlocking Subsystems (EULYNX) (Heijnen 2015). In diesen Vorhaben geht es um die Realisierung einer Aufteilung des Gesamtsystems in Teil- und Subsysteme. Die Schnittstellen müssen dabei so spezifiziert werden, dass Komponenten unterschiedlicher Hersteller kombinierbar werden.

In diesen Vorhaben wird allerdings die Funktionalität eines typischen elektronischen Stellwerks nicht verändert. Neue Ansätze benötigen jedoch eine neue funktionale Basis. Greift man auf die Funktionalitäten der herkömmlichen Technik zu, treten die Fehler den vergangenen Entwicklungen auf. Der richtige und logische Weg wäre, mit den generischen funktionalen Anforderungen anzufangen. In

der Forschungsarbeit des Autors wird das Schaffen einer einheitlichen funktionalen Basis für die neuen Entwicklungen angestrebt.

4 Ansatz Fahrzeugbewegungssicherheit

4.1 Ziel

Mit den Funktionalitäten der Fahrzeugbewegungssicherung sollen alle diejenigen Funktionen beschrieben werden, die in den einzelnen Funktionsmodulen in künftigen Architekturen realisiert werden. Das können sowohl die zentralen Elemente der Fahrwegsicherung als auch Feldelemente sein; gegebenenfalls auch Fahrzeugtechnik sowie Nahtstellen der benachbarten Gebiete. Entscheidend ist, dass die Betrachtung der Fahrzeugbewegungssicherung losgelöst von den technischen Strukturen geschehen kann.

4.2 Generische Kernanforderungen

Abgeleitet aus dem Bahnbetriebsprozess entstehen Anforderungen, die sicherungstechnisch umgesetzt werden müssen. Diese Anforderungen ergeben sich aus den maßgebenden Systemeigenschaften der Schienenbahnen (Spurführung und lange Bremswege durch geringe Haftreibung). Demnach müssen die Kollisionen und Entgleisungen vermieden werden. Während der Fahrzeugbewegung von A nach B, wie in Abb. 2 skizziert, können Kollisionen mit systemeigenen Fahrzeugen aufgrund von

- Fahrzeugbewegungen gleicher Richtung (Fahrzeug 1)
- Fahrzeugbewegungen entgegengesetzter Richtung (Fahrzeuge 2 und 3)
- entstehen.
- Zu der Entgleisung kann es durch
- das Umstellens der Weiche unter dem Fahrzeug
- falsche/keine Endlage der Weiche

führen.

Des Weiteren muss sichergestellt werden, dass das Fahrzeug den ganzen Weg entlang bis zum Ziel eine bestimmte Geschwindigkeit einhält (parametrisierbare Geschwindigkeitsübertragung vom Ziel zum Start). Denn zu hohe Geschwindigkeit kann ebenfalls zu der Entgleisung führen.

Um diese Gefährdungsmöglichkeiten auszuschließen, haben sich im Laufe der Zeit die Anforderungen an Sicherung von Fahrzeugbewegungen etabliert. Basierend auf den Ausarbeitungen von Trinckauf und Maschek in (Maschek 2014, Trinckauf 2013) werden die generischen Kernanforderungen an die Fahrzeugbewegungssicherung als grundlegende Prinzipien in der Bahnsicherungstechnik definiert:

- Sicherung beweglicher Fahrwegelemente
- Gewährleistung des Folgefahrerschutzes
- Vorgabe der zulässigen Geschwindigkeit
- Gewährleistung des Gegenfahrerschutzes
- Gewährleistung des Flankenschutzes

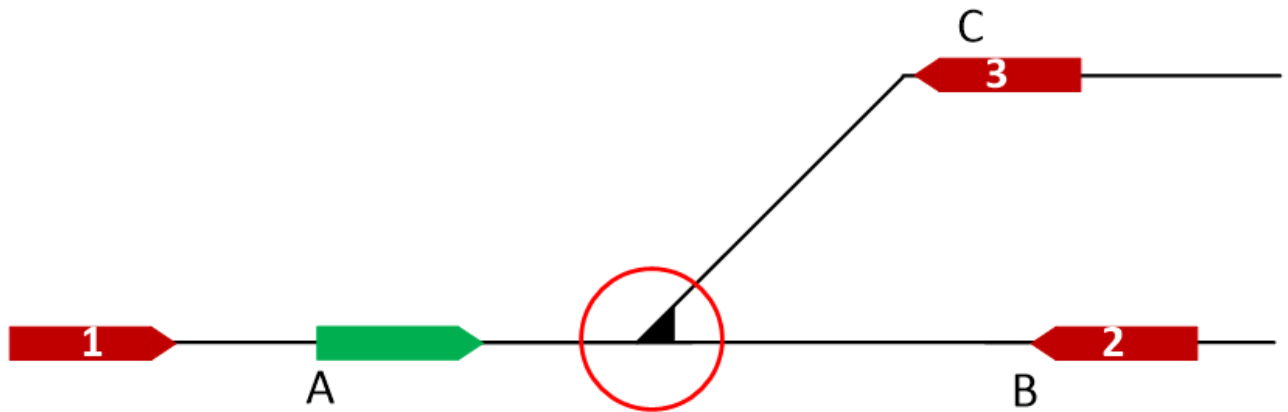


Abb. 2 Ableitung der Gefahren

4.3 Technologie

Die Technologie beschreibt, wie die funktionalen Anforderungen miteinander in Beziehung stehen. Das logische Aufeinanderfolgen von Schritten zur Fahrzeugbewegungssicherung soll in einem generischen Algorithmus anhand eines Modells beschrieben werden. Dem Modell liegt das bewegliche Fahrwegelement Weiche zugrunde. Denn die Weichen sind am häufigsten vorkommende bewegliche Fahrwegelemente. Anhand dieses Modells können sowohl die Anforderung an die Sicherung von beweglichen Fahrwegelemente als auch die Abstandshaltung modelliert werden.

Das Modell ist in Abb. 3 dargestellt und wird als „sicherungstechnischer Tripol“ bezeichnet.

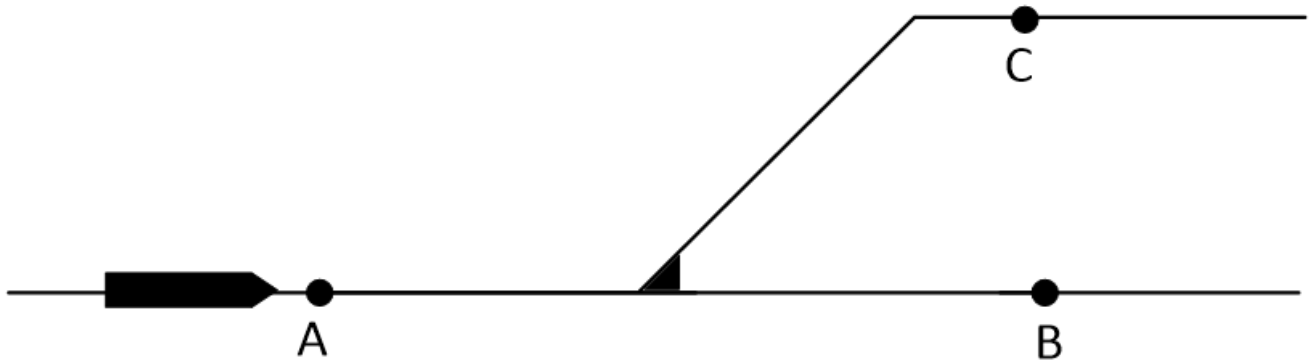


Abb. 3 Sicherungstechnischer Tripol

Es wird ein Fahrzeug betrachtet, das von A nach B verkehren soll. Die Voraussetzung dafür ist die Erfüllung der Kernanforderungen. Des Weiteren muss dem Fahrzeug die richtige Geschwindigkeit übertragen werden (ortsfeste Signale oder im Führerraum) und es muss diese Geschwindigkeit einhalten.

Die grundsätzliche Idee besteht darin, anhand eines einfachen Modells, einen generischen Algorithmus zu entwickeln, der auf den Kernanforderungen und Funktionalitäten der Fahrzeugbewegungssicherung beruht, und in einer semiformalen Form darzustellen. Im nächsten Schritt wird dieses Modell um weitere „Tripole“ erweitert. Die Technologie der Vernetzung mehrerer „Tripole“ kann sich entweder am Spurplanprinzip oder am Verschlussplanprinzip orientieren. Bei beiden Prinzipien ist eine Projektierung erforderlich. Beim Spurplanprinzip wird die Projektierung in das generische System implementiert. Beim Verschlussplanprinzip wird die Projektierung funktional außerhalb des Systems durchgeführt,

entweder simpel durch Ingenieurpersonal oder komfortabel automatisch (z. B. Herstellerwerkzeuge PT 2). Es hat den Anschein, als käme man mit dem Verschlussplanprinzip früher zu einem einsatzfähigen System, das ist jedoch eine offene Diskussion.

Der große Vorteil des Ansatzes ist dabei, dass die unveränderlichen Anteile der Systemfunktionen in Form des generischen Algorithmus der Fahrzeugbewegungssicherung idealerweise nur ein einziges Mal validiert und zugelassen werden müssen. Basierend auf dem generischen Algorithmus können unterschiedlichen Systemlösungen betrachtet werden. Für jede neue abweichende Stellwerksarchitektur müssen dann nur die Abbildung der generischen Funktionen und die zugehörigen architekturabhängigen Anforderungen validiert und zugelassen werden. (Vgl. mit Lemke in (Lemke 2013))

5 Fazit

In Europa wird nach wie vor die Harmonisierung der Eisenbahn in vielen Bereichen angestrebt. Die Funktionen zur Sicherung des Bahnbetriebes haben sich bisher einer Harmonisierung entzogen. Einer der Gründe sind die unterschiedlichen Sicherheitsphilosophien der europäischen Länder. Um auch europaweit einheitliche Sicherungsprinzipien durchzusetzen, sollen mehrere Aktivitäten in diese Richtung stattfinden. (Pachl 2011)

Mit dem generischen Ansatz einer neuen funktionalen Struktur werden die Anforderungen an die Fahrzeugbewegungssicherung unabhängig von realisierbaren technischen Lösungen generisch beschrieben und neu zugeordnet. Es wird gezeigt, wie diese Funktionalstruktur auch technisch auf der Basis bekannter und zum Teil auch eingeführter Lösungsmöglichkeiten zur Anwendung gebracht werden kann. Mit Hilfe der generischen Beschreibung der Systemfunktionalität lassen sich verschiedene technische Systemlösungen realisieren. Bis zu einem gewissen Abstraktionsniveau ist die architekturunabhängige Darstellung der Fahrzeugbewegungssicherung mit Hilfe der semiformalen Methoden möglich.

6 Literaturverzeichnis

- Bachurina, D., Trinckauf, J. (17.03.2016). Die Zukunft der Bahnsicherungstechnik unter dem Einfluss von Industrie 4.0. In: Verkehrswissenschaftliche Tage, TU Dresden, Fakultät Verkehrswissenschaften "Friedrich List".
- Bosse, G. (2012). Grundlagen für ein generisches Referenzsystem für die Betriebsverfahren spurgeführter Verkehrssysteme. Braunschweig, Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig. Dissertation.
- Elsweiler, B., Bänsch, R. (2012). Protokollschnittstellen in der Leit- und Sicherungstechnik. In: Deine Bahn, Heft 2, S. 15–18.
- Fenner, W., Naumann, P., Trinckauf, J. (2003). Bahnsicherungstechnik. Erlangen.
- Heijnen, F. (14.10.2015). EULYNX: Current status of the development of open signalling standards. Braunschweig.
- Hoeppner, S. (2015). Generische Beschreibung von Eisenbahnbetriebsprozessen. Zürich, ETH Zürich. Dissertation.

-
- Koch, T. (1997). Ein Verfahren zum Ausschluss gefährlicher Systemzustände in rechnergesteuerten Eisenbahnsicherungsanlagen.
- Lemke, O. (2013). Systems-Engineering am Beispiel dezentraler Eisenbahn-Sicherungssysteme. In: Signal+ Draht, Heft 1+2, S. 24–28.
- Maschek, U. (2009). Eine generische Sicht auf die Betriebssicherheit im spurgeführten Verkehr. In: EI-Eisenbahningenieur, Heft 2, S. 36–40.
- Maschek, U. (2014). Sicherung des Schienenverkehrs: Grundlagen und Planung der Leit- und Sicherungstechnik.
- Pachl, J. (2008) a. Betriebsverfahren im internationalen Vergleich. TU Dresden, Fakultät Verkehrswissenschaften "Friedrich List".
- Pachl, J. (2008) b. Die Bedeutung betrieblicher Regelwerke für die Leit- und Sicherungs-technik. In: Signal+Draht, Heft 12, S. 32–38.
- Pachl, J. (2011). Unterschiede bei funktionalen Sicherheitsprinzipien in der LST europäischer Bahnen. In: EIK - Eisenbahningenier Kalender, S. 197–210.
- Pachl, J. (2012). Betriebssicherheitliche Regelwerke im internationalen Vergleich. In: EI-Eisenbahningenieur, Heft 2, S. 48–52.
- Pasternok, T. Selbstkonfigurierendes dezentrales Steuerungssystem für Bahnen. Dissertation.
- Potthoff, G. (1958). Die Grundzüge des Eisenbahnbetriebes. Leipzig: Fachbuchverlag Leipzig.
- Theeg, G. (2010). Ein Beitrag zur Systematisierung der Bahnsicherungstechnik auf internationaler Ebene. Dresden, Technische Universität Dresden. Dissertation.
- Trinckauf, J. (2011). Krise in der Bahnsicherungstechnik? In: Signal+ Draht, Heft 12, S. 3.
- Trinckauf, J. (2013). Visionen und Aussichten in der Bahnsicherungstechnik. In: Deine Bahn, Heft 1, S. 7–10.
- Trinckauf, J. (2015). Wir gestalten den Technologiewandel! In: Signal+ Draht, Heft 1+2, S. 3.
- Wagner, R., Schachler, M., König, N. H. (2012). Das Projekt SwISS – Schnittstellenstandards für die SBB. In: Signal+Draht, Heft 10, S. 22–26.
- Zoeller, H.-J. (2002). Handbuch der ESTW-Funktionen: Die Sicherungsebene im Elektronischen Stellwerk: Tetzlaff Verlag GmbH & Co. Kg.

Entwurf einer neuen, regelbasierten Sicherungslogik unter Annahme der vollständigen Ortung aller Schienenfahrzeuge

Frederik Döpmeier¹

¹Institut für Bahnsysteme und Bahntechnik TU Darmstadt

Abstract

Dieses Paper beschreibt den Ansatz einer neuen regelbasierten Sicherungslogik mit Bezeichnung „smartLogic“ unter Annahme einer signaltechnisch sicheren und vollständigen Ortung aller Zugfahrten in ihrem Zuständigkeitsbereich. Die Sicherungslogik wird dabei gelöst von den bewährten sicherungstechnischen Ansätzen auf Basis einer Gefährdungs- und Funktionsanalyse entwickelt. Der Aufbau orientiert sich unter Annahme eines gegebenen Sicherheitsniveaus an sieben gemeinsam mit der DB Netz AG entwickelten Zieldimensionen, in denen Verbesserungen gegenüber aktuellen Eisenbahnsicherungstechnologien erzielt werden sollen. Das Paper beschreibt die Vorgehensweise der Entwicklung sowie den grundsätzlichen modularen Aufbau der neuen Sicherungslogik und evaluiert deren Nutzen in Hinblick auf die Zieldimensionen und die zu erwartenden Herausforderungen des neuen sicherungstechnischen Ansatzes.

1 Einleitung und Motivation

Die bisherige Eisenbahnsicherungslogik ist im Grundsatz deutlich mehr als 100 Jahre alt und basiert im Wesentlichen auf den Konzepten der Signalabhängigkeit, des Fahrwegverschlusses sowie des Strecken- und Bahnhofsblocks, wie sie bereits im mechanischen Stellwerk realisiert worden sind. Damit wird den Gefährdungen „Entgleisung“ und „Kollision mit einer anderen Zugfahrt“ zuverlässig begegnet. Neuere Stellwerksgenerationen bis hin zu den heutigen ESTWs adaptierten die alte Logik auf die neuen technischen Gegebenheiten und besserten lediglich durch Unfallereignisse offenbarte Fehlerquellen aus. Wesentliche Sicherheitsgewinne im System Bahn konnten dabei vor allem durch die Einführung von Gleisfreimeldeeinrichtungen und Zugbeeinflussungseinrichtungen erzielt werden. Eine grundsätzliche Revision der zugrundeliegenden Sicherungslogik erfolgte allerdings nicht. Dies ist aufgrund des bereits erreichten, sehr hohen Sicherheitsniveaus, des schwierig zu führenden Nachweises der gleichen Sicherheit und des eingeschränkten Nutzens bei nur geringfügig veränderten äußeren Rahmenbedingungen nachvollziehbar. Die sich in absehbarer Zukunft abzeichnenden deutlichen Veränderungen der Rahmenbedingungen, z.B. durch die Möglichkeit der vollständigen Zugortung und der hoch verfügbaren Datenübertragung, bieten zusammen mit der Möglichkeit der formalen Nachweisführung durch im Computer abbildbare Betriebsprozesse nun jedoch geeignete Rahmenbedingungen, die Sicherungslogik einmal von Grund auf neu zu denken. Schon die zum Teil erheblich unterschiedlichen Sicherungsansätze in einigen anderen Ländern zeigen, dass die bisherige Sicherungsphilosophie nicht in Stein gemeißelt sein muss (vgl. z.B. PACHL in (Pachl 2016)). In diesem Zusammenhang beschäftigt sich das Fachgebiet Bahnsysteme und Bahntechnik der TU Darmstadt im Rahmen der gemeinsamen Innovationsallianz mit der Deutschen Bahn AG im Projekt smartLogic mit einer neuen regelbasierten Sicherungslogik. Das Projekt ist Bestandteil der Arbeitsgruppe Signalling, in deren Rahmen in einem interdisziplinären Team an verschiedenen Herausforderungen der digitalen Leit- und Sicherungstechnik (LST) gearbeitet wird. In diesem Paper werden die Grundzüge des Entstehungsprozesses der neuen Logik „smartLogic“ beschrieben, die sich auf die Annahmen der

sicheren, vollständigen Ortung der Zug- und Rangierfahrten sowie der Möglichkeit der Vorgabe eines vollständig flexiblen, d.h. an die Betriebssituation anpassbaren, Geschwindigkeitsprofils stützt, wie es in ETCS L2 und L3 über das Static Speed Profile übermittelt werden kann³ (European Railway Agency 2016). Des Weiteren wird der grundsätzliche Aufbau der Logik zur Diskussion gestellt. Die Ausrichtung erfolgt dabei an sieben Zieldimensionen, die im Folgenden Abschnitt näher erläutert werden.

2 Zieldimension

Um eine neue Sicherungslogik unbeeinflusst von bisher existierenden Sicherungsphilosophien zu entwerfen, ist es zunächst erforderlich, sich Klarheit über die Zieldimensionen zu verschaffen, welche die Logik erreichen soll. Die neue Sicherheitslogik muss natürlich ebenfalls „sicher“ sein, also die vorgegebene Ausfallrate mit Eintritt eines kritischen Zustands einhalten. Diese Anforderung ist daher auch keine Zieldimension, sondern eine Nebenbedingung. Eine Steigerung über das aktuelle Maß an Sicherheit hinaus ist als Zieldimension denkbar. Jedoch liegt dies angesichts des bereits sehr hohen Sicherheitsniveaus bei der Eisenbahn nicht im Fokus des Projekts smartLogic. Mögliche weitere Steigerungen der Sicherheit werden eher als positive Nebeneffekte betrachtet⁴. Im Fokus der Entwicklung der neuen Sicherungslogik stehen daher die in Tabelle 1 aufgeführten Zieldimensionen. Diese wurden in Zusammenarbeit mit der DB Netz AG entwickelt⁵. Die neue Logik wird sich an diesen Zieldimensionen messen müssen.

Tab. 1 Zieldimensionen für die neue Sicherungslogik

Zieldimension	Nutzen
Kapazitätserweiterung	Bessere Ausnutzung der Infrastruktur, dadurch Senkung der Grenzkosten und Ermöglichen von Angebotsausweitungen, welche zur Flexibilisierung des Angebots beitragen
Vereinfachung/Verkürzung des Planungs- und Zulassungsprozesses	Günstigere und schnellere Umstellung alter Systeme auf die neue Logik
Flexible Einsetzbarkeit	Einsetzbarkeit in einem möglichst großen Teil des Netzes sicherstellen; Kompatibilität zu anderen Systemen und Forschungsvorhaben

³ Die Geschwindigkeit kann an beliebigen Punkten (theoretisch in einem Abstand von minimal 10 cm) in 5 km/h-Schritten angegeben werden.

⁴ Dies gilt auch für die Anforderungen aus Sicht der Cyber Security, die an der TU Darmstadt in einer eigenen Arbeitsgruppe in Kooperation mit der DB Netz AG und weiteren Partnern bearbeitet werden.

⁵ Es gibt mehrere Zielgrößen, die nicht untereinander gewichtet sind, da hier nicht eine Optimierung im Vordergrund steht, sondern ein Überblick über die Kriterien, an denen sich eine neue Logik messen lassen muss. Die Zielgrößen werden daher hier als „Zieldimensionen“ bezeichnet.

Geringer Projektierungsaufwand	Einfache Implementierung auf neuen Infrastrukturen, erleichtertes Einrichten von Bauzuständen und erleichtertes Vornehmen von Veränderungen am Spurplan
Robustheit	Minimierung der Anzahl der Störungen, Vorhalten vertretbarer Rückfallebenen und verbessertes Abbauen von Verspätungsminuten
Flexible und ergonomische Bedienung	In Zeiten sinkender Fachkräfte ist die Arbeitskraft des Personals als wertvolle Ressource zu betrachten, die möglichst effizient einzusetzen ist
Senkung der Kosten	Neuer Spielraum für niedrigere Trassenpreise als Grundlage für die Sicherung von Marktanteilen auf der Schiene

3 Abgrenzung zu anderen Arbeiten

Bereits zahlreiche andere Arbeiten beschäftigten sich mit der Formalisierung sicherungstechnischer Prinzipien und der Beschreibung der Prozesse der Sicherungslogik in Algorithmen. Diese gingen dabei allerdings im Regelfall noch von den klassischen Prinzipien wie der Blocksicherung aus. So formuliert HÖPPNER in (Höppner 2015) aufbauend auf der Dissertation von BOSSE (Bosse 2010) eine generische Beschreibung grundlegender betrieblicher Prozesse und sicherheitstechnischer Abhängigkeiten mit Hilfe von UML-Diagrammen auf Basis der klassischen Sicherungslogik. Ein früherer, eher allgemeiner Ansatz, der auch bereits Fahren im Raumabstand miteinbezieht, ist in der Dissertation von Meyer zu Hörste (Meyer zu Hörste 2004) zu finden. Logikbausteine werden hier in Form von Petri-Netzen beschrieben. Die Beschreibung ergibt allerdings noch keine ganzheitliche Sicherungslogik. TRINCKAUF und BACHURINA schlagen in (Trinckauf und Bachurina 2016) eine funktionale Struktur der LST vor. Diese ist unabhängig von technischen Realisierungen und orientiert sich an den „Kernanforderungen“ einer sicheren Bewegung der Eisenbahnfahrzeuge wie sie in der Einleitung beschrieben waren. Dabei gehen sie davon aus, dass einige Aufgaben des Eisenbahnsicherungswesens nicht mehr von streckenseitigen Sicherungseinrichtungen übernommen werden, sondern von den Fahrzeugen selber, z.B. der Schutz vor Auffahrunfällen.

4 Systemumfeld, Annahmen und Voraussetzungen

Im nächsten Schritt ist das Systemumfeld der Logik abzugrenzen und damit zu klären, unter welchen Voraussetzungen diese arbeiten soll. Aufgrund der Zieldimension der flexiblen Einsetzbarkeit ist anzustreben, die Kompatibilität der neuen Logik zu möglichst vielen denkbaren, benachbarten Systemen zu sichern. Aus diesem Grunde und auch, um den Zulassungsprozess zu vereinfachen, ist sie möglichst modular zu gestalten. Dennoch sind an dieser Stelle einige Einschränkungen und Annahmen erforderlich. Abb. 1 zeigt die Systemumgebung der neuen Sicherungslogik.

An dieser Stelle soll nur auf die Annahmen, die dem Projekt smartLogic zu Grunde liegen, eingegangen werden. Nähere Erläuterungen zu den einzelnen Elementen finden sich im Abschnitt Funktionsanalyse.

Es wird davon ausgegangen, dass die einzelnen Infrastrukturobjekte (in der Grafik grün hinterlegt) autonom über standardisierte Schnittstellen angesteuert werden, wie sie in den Projekten NeuPro und EULYNX (vgl. www.eulynx.eu) von der Deutschen Bahn und europäischen Partnern spezifiziert werden.

Als Schnittstelle zum Fahrzeug (in der Grafik blau hinterlegt) werden Fahrerlaubnisse im Format von ETCS Movement Authoritys (MA) in L2 bzw. L3 verwendet, sodass die ETCS-Schnittstelle genutzt werden kann (vgl. zum Aufbau der MA (European Railway Agency 2016)). Dabei wird davon ausgegangen, dass Züge signaltechnisch sicher und vollständig (inkl. Zugschlusserkennung) mit einer Genauigkeit in der Größenordnung von 1 m geortet werden können. Diese Genauigkeit erfüllt auch das Kriterium der gleisgenauen Ortung.

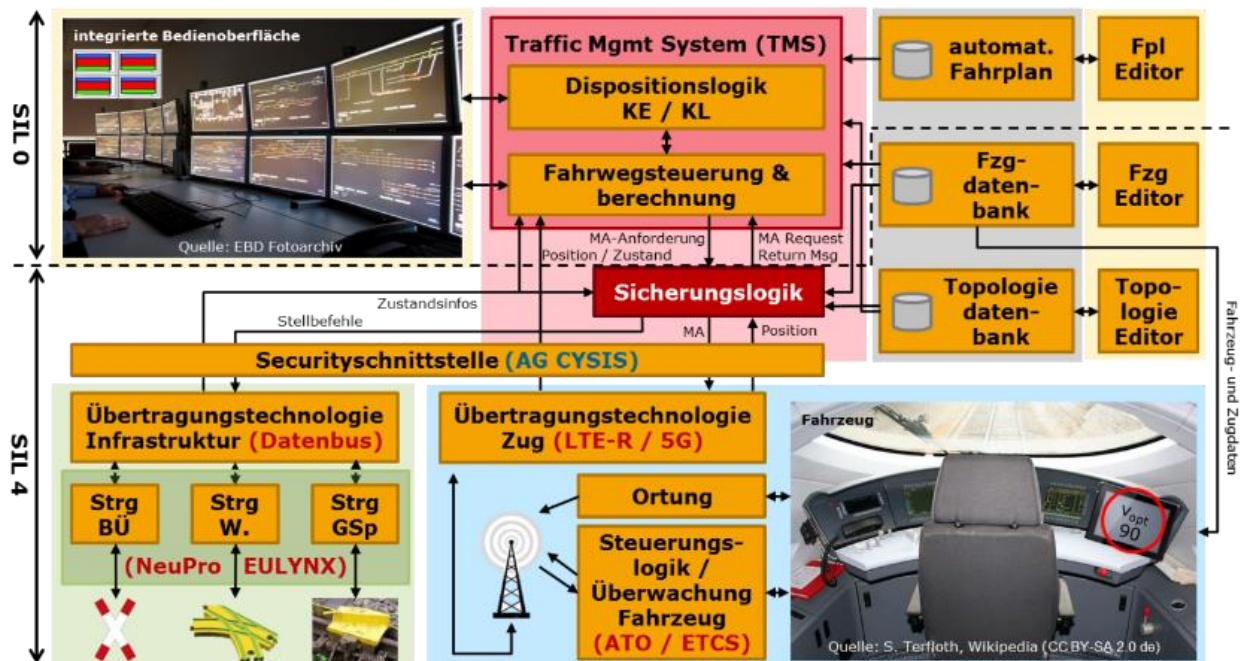


Abb. 1 Systemumgebung der Sicherungslogik

Beim autonomen Fahren (ATO) folgt das Fahrzeug idealerweise ebenfalls der ETCS MA um weitere Schnittstellen zwischen Fahrzeug und Strecke, die in einem aufwändigen Verfahren europäisch standardisiert werden müssten, zu vermeiden. Die erforderlichen Fahrzeugdaten wie Zuglänge und Bremsvermögen stammen dabei aus einer sicheren, externen Quelle. Diese muss nicht unbedingt im Fahrzeug liegen. Beispielsweise ist im Falle von ATO evtl. gar kein Triebfahrzeugführer mehr vorhanden, der die entsprechenden Eingaben machen könnte. Für einige Werte sind auch streckenseitige Sensoren denkbar. Die Fahrzeugdatenbank ist daher in Abb. 1 zusammen mit den anderen erforderlichen Datenquellen als separates System (grau hinterlegt) dargestellt.

Das Control Center (in der Grafik gelb hinterlegt) wird ebenfalls als autonome Einheit betrachtet, welches über eine standardisierte Schnittstelle angebunden ist.

Der rot hinterlegte Bereich entspricht dem Kern der Aufgaben bisheriger Stellwerkssysteme und wird daher im Weiteren näher betrachtet. Um den Projektierungs- und Zulassungsprozess gemäß den Zieldimensionen möglichst einfach zu halten, geht das Projekt smartLogic davon aus, dass die eigentliche Sicherungslogik so schlank wie möglich ausgeführt ist. Daraus folgt, die Aufgaben bisheriger Stellwerkssysteme werden in einen Sil 4- und einen Sil 0-Teil aufgeteilt. Im Sil 0-Teil befindet sich die Intelligenz in Form eines Traffic Management Systems (TMS). Hier wird das Betriebsgeschehen

vorausberechnet und es werden die optimalen Fahrkurven für die einzelnen Fahrten bestimmt, aus denen die MAs generiert werden. Der Sil 4-Teil in Form der Sicherungslogik beschränkt sich auf die Funktion einer Wächterin. Sie kontrolliert ständig alle Zustände sowie die Kommunikation zwischen dem TMS und den Fahrzeugen. Jede MA und jeder Stellbefehl werden von ihr überprüft und freigegeben oder zurückgewiesen. Da nur die Sicherungslogik sicherheitskritisch ist, muss nur diese den Sicherheitsnachweis erbringen. Im Traffic Management System können dagegen beliebig neue Funktionen implementiert werden, um den Betriebsablauf zu optimieren. TMS und Sicherungslogik sind Applikationen, die am gleichen Ort ausgeführt werden können, aber nicht müssen.

5 Vorgehen bei der Erstellung der Sicherungslogik

Im Folgenden ist das Vorgehen beschrieben, nachdem die neue Sicherungslogik erstellt werden soll.

Ausgangspunkt ist eine eingehende **Gefährdungsanalyse**. Bisher beschränkt sich das Eisenbahnsicherungswesen in Deutschland im Wesentlichen auf die Vermeidung der beiden Hauptgefährdungen „Kollision“ und „Entgleisung“. Kollision bezieht sich dabei auf den Kontakt mit anderen Schienenfahrzeugen und in der Bahnübergangssicherungstechnik mit anderen Teilnehmenden am Verkehr. Bei einer Entgleisung wird vor allem an die Ursachen „überhöhte Geschwindigkeit“ und „Umstellen einer Weiche unter dem fahrenden Zug“ gedacht. Um unvoreingenommen an die Entwicklung der Sicherungslogik heranzugehen, werden die potenziellen Gefährdungen in der Betrachtung für das Projekt smartLogic jedoch nicht auf diese bereits bekannten Sicherungskonzepte beschränkt. Stattdessen wird eine neue Systematisierung vorgenommen. Als Quellen für die Gefährdungsanalyse dienen die offiziellen Berichte zu gefährlichen Ereignissen im Zusammenhang mit dem Schienenverkehr der Eisenbahnunfalluntersuchungsstelle des Bundes (EUB 2017), aber auch eine Analyse möglicher Ausfälle analog einer Risikoanalyse. Um keine relevanten Gefährdungen vorzeitig auszuschließen, erfolgt die Sammlung zunächst unabhängig davon, ob die Gefährdung sinnvoll durch die LST verhindert werden kann. Diese Beurteilung folgt im zweiten Schritt, wobei die Gefährdungen in die drei Kategorien „vollständig Aufgabe der LST“, „teilweise Aufgabe der LST“ oder „nach derzeitigem Stand nicht Aufgabe der LST“ eingeordnet werden. Beispielsweise ist das Thema Kollision nur teilweise Aufgabe der LST. Die Verfeinerung „Kollision mit einem anderen Schienenfahrzeug“ ist aber vollständig Teil der LST, während sich die Kollision mit einer Person nach heutigem Stand nicht vollständig vermeiden lässt. Um letztere Gefährdung klar zuordnen zu können, müsste sie also weiter verfeinert werden. Abb. 2 zeigt einen Auszug der Ergebnisse der Gefährdungsanalyse, in der die Verfeinerungen des Astes „Kollision“ aufgeklappt sind.

An die Gefährdungsanalyse schließt sich eine ausführliche **Funktionsanalyse** an. In dieser wird der funktionale Umfang der neuen Sicherungslogik abgesteckt.

Die Funktionen leiten sich zum einen aus der Gefährdungsanalyse ab, zum anderen aus den Aufgaben bisheriger Stellwerke wie sie u.a. im Lastenheft ETCS und der Ril 408 beschrieben sind. Mit dessen Hilfe werden auch die aus der Gefährdungsanalyse abgeleiteten Funktionen auf Vollständigkeit überprüft. Da in bisherigen Stellwerkslogiken nicht immer klar zwischen Sicherungslogik und TMS getrennt wird und Aufgaben des TMS heute häufig noch von Personen ausgeführt werden, ist es erforderlich die Funktionen des TMS mitzubetrachten. Es können zwei Kategorien von Funktionen unterschieden werden: Betriebliche Funktionen, die zur möglichst effizienten Abwicklung des Bahnverkehrs dienen und sicherungstechnische Funktionen. Die Einbeziehung heutiger Regelwerke in die Funktionsanalyse birgt die Gefahr in bewährte Denkmuster zurückzufallen. Es ist daher unbedingt darauf zu achten, die Funktionen möglichst generisch zu beschreiben. Dafür wird jede einzelne funktionale Anforderung

kritisch hinterfragt und auf ihren inhaltlichen Kern reduziert. Im zweiten Schritt erfolgt eine zweifache Einordnung der Funktionen.

Zunächst werden diese den beiden Komponenten Sicherungslogik und Traffic Management System (TMS) zugeordnet. Aus den Zieldimensionen ergibt sich keine Anforderung in Bezug auf die Rechenzeit, wohl aber daran, dass die Sicherungslogik so schlank wie möglich sein sollte. Deshalb wird bei einer Zuweisung einer Funktion an die Sicherungslogik sehr genau geprüft, ob diese für ihre Wächterfunktion wirklich erforderlich ist. Da das TMS alle Anfragen an die Sicherungslogik wie MA und Stellwünsche bereits vollständig vorausberechnet, können Funktionen auch in beiden Systemkomponenten erforderlich sein. Für die weitere Bearbeitung im Projekt smartLogic steht allerdings zunächst nur die Sicherungslogik im Fokus. Als weitere Einordnung werden die Funktionen in einen Basisfunktionsumfang und einen erweiterten Funktionsumfang eingeordnet, der in Zusammenarbeit mit der DB Netz AG priorisiert wird.

Aus den Basisfunktionen wird im weiteren Verlauf des Projekts eine erste Version der regelbasierten Sicherungslogik entworfen und im Eisenbahnbetriebsfeld Darmstadt (EBD) als Demonstrator integriert. Dabei wird jedoch darauf geachtet, dass die spätere Erweiterbarkeit in Bezug auf den erweiterten Funktionsumfang gegeben bleibt. Die Basis-Logik wird im EBD getestet und mit Experten evaluiert. Im Anschluss kann sie schrittweise erweitert werden.

Legende

- Rot:** kann (theoretisch) durch LST verhindert werden
- Orange:** kann teilweise durch LST verhindert werden
- Neutral:** derzeit nicht mit LST zu lösen



Abb. 2 Auszug aus der Gefährdungsanalyse

6 Aufbau und Funktionsweise der neuen Sicherungslogik

Im Folgenden soll die grundsätzliche Struktur der neuen Sicherungslogik erläutert werden. Die Sicherungsfunktionen heutiger elektronischer Stellwerke sind bereits sehr umfangreich. Dies führt sogar soweit, dass für bestimmte Anwendungsfälle, wie z.B. besonders kleine Betriebsstellen oder Strecken mit vereinfachter Betriebsabwicklung, z.B. im signalisierten Zugleitbetrieb, einfachere, schlankere Lösungen bevorzugt werden als das Voll-ESTW. Zugleich gibt es aber auch immer wieder neue

Anforderungen, die sich aus Unfallereignissen oder anderen zusätzlichen Sicherungswünschen ergeben. Als Beispiel ist die aktuelle Entwicklung eines Tunnelbegegnungsverbotes für Güter- und Personenzüge zu nennen oder Bestrebungen die Arbeitssicherung durch Mitwirkung der Bautrupps an der Gleissperrung und -freigabe zu erhöhen. Solche Änderungen an bestehenden Stellwerkslogiken führen derzeit zu einem hohen zusätzlichen Projektierungs- und Genehmigungsaufwand. Für smartLogic ergibt sich daher in Hinblick auf die Zieldimension der „flexiblen Einsetzbarkeit“ die Anforderung nicht nur modular zu sein, um kompatibel zu vorhandenen Infrastrukturen und Fahrzeugen zu bleiben, sondern auch modular in Bezug auf den Funktionsumfang der Stellwerkslogik. Aus diesem Grund abstrahiert die Logik von konkreten Anwendungsfällen, wie der Sicherung eines Bautrupps, auf eine allgemeinere Stakeholder-Abonnement-Ebene. Von der regelbasierten Sicherungslogik wird erstmal nur garantiert, dass die sicherungstechnischen Anforderungen 1. Ordnung (vgl. Einteilung nach TRINCKAUF in (Trinckauf 2013)) garantiert sind: Schutz vor Entgleisung, Schutz vor Kollision.

Im Bereich des Kollisionsschutzes erübrigt die genaue Ortung inklusive Zugvollständigkeitskontrolle zusammen mit den Funktionen von ETCS wie Stillstandskontrolle eine Unterscheidung in Folge- und Gegenfahrerschutz. Einzig der Flankenschutz ist noch separat zu betrachten, da zusätzliche Stellelemente angesteuert werden müssen. smartLogic verwendet dabei Gefahrenbereiche um die Fahrzeuge analog des Schweizer Ansatzes (vgl. z.B. in (Zehnder 2016)). Die Größe der Gefahrenbereiche richtet sich nach dem tatsächlichen Gefahrenraum inkl. Sicherheitszuschlag, der von zahlreichen Faktoren abhängt, vor allem von der gefahrenen Geschwindigkeit. Ein solcher Gefahrenraum kann auch um Fahrten gelegt werden, welche heute als Rangierbewegungen gelten, sofern diese entsprechend vollständig ortbar sind. Es gilt der Grundsatz, dass sich zwei Gefahrenbereiche nicht überlappen dürfen. Eine Rangierfahrt könnte aufgrund der Geschwindigkeitsabhängigkeit des Gefahrenbereichs z.B. durch eine entsprechend vorgegebene Bremskurve bis auf 1 m (Ortungsgenauigkeit) sicher an einen im Bahnhof wartenden Personenzug herangeführt werden.

Für alle weiteren Funktionen vertraut die Logik auf die sichere Zulieferung von Stakeholder-Listen. Dafür sind Schnittstellen definiert, die von beliebigen Stakeholdern abonniert werden können. Die Stakeholder müssen dafür von vertrauenswürdiger Seite autorisiert worden sein. Die Schnittstellen sind aus Sicht der Sicherungslogik funktional gegliedert. Im Falle des Bautrupps gibt es beispielsweise eine Zustimmungs-Schnittstelle, welche dieser abonniert hat. Die Sicherungslogik prüft vor Genehmigung einer MA, ob die Zustimmungen aller Abonnenten der Schnittstelle vorliegen. Die gleiche Zustimmungs-Schnittstelle könnte aber auch von einem BÜ-Sicherungsposten abonniert werden, der vorübergehend eine außer Betrieb befindliche Bahnübergangssicherungsanlage sichert. Andere Schnittstellen gibt es z.B. für reine Leseaktivitäten, für vorgeschriebene Warnmeldungen (hierbei ist die Erreichbarkeit der Abonnenten Voraussetzung für die Ausstellung einer MA) oder wenn von der Sicherungslogik bestimmte Handlungen oder Überwachungsleistungen erforderlich sind. Die Komplexität verlagert sich von der allgemeingültigen Logik auf die Eingangsdaten, welche ebenfalls signaltechnisch sicher sein müssen. Schließlich wäre es äußerst ungünstig, wenn ein sicherheitsrelevantes Element wie ein BÜ auf der Abonnement-Liste der entsprechenden Schnittstelle fehlen würde. Es kann jedoch individuell entschieden werden, wieviel Ressourcen für die Prüfung von Spurplan, Stakeholder-Abonnement-Listen und Fahrzeugdaten zur Verfügung stehen und wie umfangreich diese dann jeweils werden dürfen.

Die Sicherungslogik kennt mehrere Arten von Funktionen. Prozesse wie die „Genehmigung einer vom TMS beantragten MA“ oder ein Stellbefehl werden von übergeordneten Systemkomponenten, in der Regel dem TMS, über die entsprechende Schnittstelle angestoßen und implizieren die parallele Abfrage der definierten Stakeholder-Listen für den Prozess sowie der fest definierten Voraussetzungen. Sind alle

Voraussetzungen erfüllt, kann die angestoßene Aufgabe ausgeführt werden. Daneben gibt es Überprüfungsfunktionen, die regelmäßig ablaufen oder solange eine MA für den entsprechenden Bereich ausgestellt ist. Dazu gehören auch Positionsüberwachung der Fahrten und Funktionsüberwachung kritischer Systemkomponenten sowie der angemeldeten Stakeholder.

Eine weitere Modularisierungs-Anforderung an die Logik stützt sich auf die Zieldimensionen „Vereinfachung/Verkürzung des Planungs- und Zulassungsprozesses“ und „Geringer Projektierungsaufwand“. Demnach sollte die neue Sicherungslogik „smartLogic“ unabhängig von konkreten Ausprägungen der Infrastruktur und der Fahrzeuge sein. smartLogic wird daher topologieunabhängig geplant. Der Spurplan bzw. eine Liste zulässiger Fahrwege und deren Geschwindigkeit, wie in vielen heutigen ESTW, ist also ähnlich wie in Spurplanstellwerken aus der Relaistechnik nicht mehr direkter Bestandteil der Sicherungslogik. Stattdessen greift diese für Funktionen wie die Zulässigkeitsprüfung einer MA auf den Spurplan aus einer signaltechnisch sicheren externen Quelle zu. Im Unterschied zu den Spurplanstellwerken gibt es aber keine definierten Start- und Zielpunkte in Form von Signalen mehr. Damit der Spurplan von der Sicherungslogik eingelesen werden kann, muss er in einem standardisierten Datenformat vorliegen. Dieselbe Quelle sollte für die Vorabberechnung der MAs auch vom TMS verwendet werden. Eine geprüfte Liste zulässiger Fahrwege kommt für die smartLogic auch deshalb nicht in Frage, weil es durch die oben beschriebene Annahme der vollständigen Ortung und dem damit verbundenen Wegfall der Fahrstraßenstart- und -zielpunkte eine große Zahl an möglichen Fahrwegen gibt, für die eine MA ausgestellt werden kann.

Subsysteme wie Weichen müssen dabei auch nicht mehr fest einem bestimmten Stellwerk bzw. einer Stellwerkslogik zugeordnet sein, sondern können bedarfsgerecht bei einer Logik angemeldet werden. Hierbei sind Sicherungsmechanismen vorzusehen, wie die Sendung eines allgemeinempfindlichen Störungscode, falls ein Element bei keinem Stellwerk angemeldet ist. Dies kann durch das Ausbleiben einer Statusabfrage, welche die Sicherungslogik regelmäßig an alle angemeldeten Elemente und Stakeholder sendet, registriert werden. Somit kann der Zuschnitt von Stellbezirken ebenfalls relativ einfach an aktuelle Erfordernisse angepasst werden.

Die Fahrzeugdaten stammen ebenfalls aus einer signaltechnisch sicheren externen Quelle. (vgl. hierzu auch die Systemgrafik in Abb. 1). Diese muss nicht zwangsläufig innerhalb des Fahrzeugs liegen oder der Triebfahrzeugführer sein. Das Projekt smartLogic geht davon aus, dass eine solche sichere Quelle vorhanden ist.

7 Mögliche Probleme

Wie bereits erwähnt, liegen neben der eigentlichen Sicherungslogik auch die Eingangsdaten Spurplan, Stakeholder-Abonnement-Listen und Fahrzeugdaten im Sil 4-Bereich, sie sind also signaltechnisch sicher auszuführen. smartLogic geht davon aus, dass die Validität dieser Daten gesichert ist. Es muss also ein strukturierter Prozess gefunden werden, der diese Anforderung garantiert.

Die vielen externen sicherheitskritischen Schnittstellen bedingen auch eine größere Gefahr möglicher mutwilliger Angriffe von außen. Aus diesem Grund darf der Aspekt der Cyber-Security nicht vernachlässigt werden, der innerhalb des RailLabs an der TU Darmstadt von der AG CyberSecurity bearbeitet wird.

Eine Gefahr des neuen Ansatzes ist, dass neue Sicherheitspotenziale den falschen Eindruck erwecken, die Eisenbahn sei momentan unsicher. Dies ist statistisch nachweisbar nicht der Fall (vgl. z.B. (Vorndran

2010)). Stattdessen bringen neue Technologien und Sicherheitseinrichtungen immer auch neue Probleme mit sich, die vielleicht zuerst gar nicht im Betrachtungshorizont lagen.

Die Entwicklung eines völlig neuen Ansatzes mit gleicher Sicherheit, wie die in einem über hundertjährigen Prozess entwickelten Sicherungslogiken der verschiedenen Länder, klingt erst einmal gewagt. Vor allem in Anbetracht dessen, dass die bestehenden Sicherungslogiken „mit Blut geschrieben sind“, also aus den Erfahrungen zahlreicher tragischer Unglücksfälle immer weiter verfeinert wurden bis zu ihrer heutigen weitgehenden Perfektion. Deshalb ignoriert der neue Ansatz nicht alle Erfahrungen die bisher gemacht wurden, sondern gleicht seinen Funktionsumfang mit ihnen ab. Dies erfolgt in Form des Abgleichs der Funktionen mit Anforderungen aus bestehenden Regelwerken. Allerdings bleibt die Gefahr durch die neue Logik neue Sicherheitsprobleme zu schaffen. Dieser Gefahr wirkt eine Risikoanalyse entgegen, welche sowohl auf Experten, als auch auf formale Verifizierungsprozesse baut. Die formalisierte formulierte, regelbasierte Logik bietet auch die Möglichkeit formale Nachweise zu führen und eine große Anzahl möglicher Betriebssituationen zu simulieren. In diesem Zusammenhang ist auch ein Demonstrator im Eisenbahnbetriebsfeld Darmstadt geplant.

8 Fazit und Ausblick

Der Ansatz der neuen Logik ist in Bezug auf die zu Beginn aufgeworfenen Zieldimensionen vielversprechend. Durch die dynamische Gleisbelegung auf Basis der Annahme der vollständigen Ortung kann in Zusammenhang mit einem intelligenten, übergeordneten TMS die Infrastruktur flexibler allokiert und freigegeben werden. smartLogic ist damit eine der Voraussetzungen für eine kapazitätsoptimale Nutzung der Infrastruktur. Dies wirkt sich insbesondere auch bei der Zieldimension „Robustheit“ aus. Gerade im Störfall oder bei verspäteten Zügen, kann das Netz flexibler genutzt werden. Durch den modularen Aufbau wird eine grundsätzliche Unterteilung der Technologie in Produkte verschiedener Preisklassen überflüssig. Die Logik funktioniert allgemeingültig und die Grenzkosten für die Implementierung auf einer neuen Infrastruktur beliebiger Größe sind gering. Dies zählt auf die Zieldimension der „flexiblen Einsetzbarkeit“ ein. Aufgrund der Topologieunabhängigkeit ist der Projektierungsaufwand ebenfalls geringer als bei Stellwerken mit Fahrstraßenlogik. Die strikte Trennung zwischen TMS und Sicherungslogik vereinfacht den Zulassungsprozess, da im TMS neue Funktionalitäten beispielsweise für intelligentere Fahrwegzuweisung implementiert werden können, ohne die Sicherungslogik **anpassen** zu müssen. Alle diese Punkte führen auch zu einer Senkung der Kosten für die Bahnproduktion.⁶

Die im Abschnitt mögliche Probleme angesprochenen Herausforderungen dürfen beim Entwicklungsprozess jedoch keinesfalls vernachlässigt werden.

smartLogic wird allerdings insbesondere im Bereich Kapazitätssteigerung und Flexibilisierung nur Erfolge ermöglichen, wenn parallel auch das übergeordnete Traffic Management System mit intelligenter Disposition mitgedacht wird, welches die Potenziale der dynamischeren Sicherungslogik nutzen kann.

⁶ Auf die Zieldimension „Flexible und ergonomische Bedienung“ und einige Aspekte der Zieldimension „Robustheit“ wurde aufgrund des Umfangs des Papers an dieser Stelle noch nicht näher eingegangen. Bei der Gestaltung der smartLogic werden aber Rückfallebenen und die Anforderung der flexiblen Zuweisung der Steuerungseingriffe zu verschiedenen Arbeitsplätzen mitberücksichtigt.

9 Literaturverzeichnis

- Bosse, G. (2010). Grundlagen für ein generisches Referenzsystem für die Betriebsverfahren spurgeführter Verkehrssysteme. Dissertation an der Technischen Universität Braunschweig.
- Eisenbahnunfalluntersuchungsstelle des Bundes (EUB) (2017), Unfalluntersuchungsberichte: Online unter https://www.eisenbahn-unfalluntersuchung.de/EUB/DE/Publikationen/publikationen_node.html
- European Railway Agency (2016). ERTMS/ETCS subset-026 System Requirement Specification, version 3.4.0, Chapter 7 ERTMS/ETCS language. Brüssel.
- Höppner, S. (2015). Generische Beschreibung von Eisenbahnbetriebsprozessen. Dissertation an der ETH Zürich.
- Meyer zu Hörste, M. (2004). Methodische Analyse und generische Modellierung von Eisenbahnleit- und -sicherungssystemen. In Fortschritt-Berichte VDI, Reihe 12, Nr. 571. VDI-Verlag, Düsseldorf.
- Pachl, J. (2016). Besonderheiten ausländischer Eisenbahnbetriebsverfahren – Grundbegriffe, Stellwerksfunktionen, Signalbegriffe. Essential. Springer Vieweg, Wiesbaden.
- Trinckauf, J. (2013). Visionen und Aussichten in der Bahnsicherungstechnik. In Deine Bahn 1/2013, S. 7-10.
- Trinckauf, J., Bachurina, D. (2016). Die Zukunft der Bahnsicherungstechnik unter dem Einfluss von Industrie 4.0. Konferenzbeitrag für die Verkehrswissenschaftlichen Tage 2016, Dresden.
- Vorndran, I. (2010). Unfallstatistik – Verkehrsmittel im Risikovergleich. Statistisches Bundesamt, Wiesbaden.
- www.eulynx.eu
- Zehnder, M. (2016). Das Potenzial der genauen, sicheren Lokalisierung. Vortrag auf dem 16. Internationalen SIGNAL+DRAHT-Kongress, Fulda.